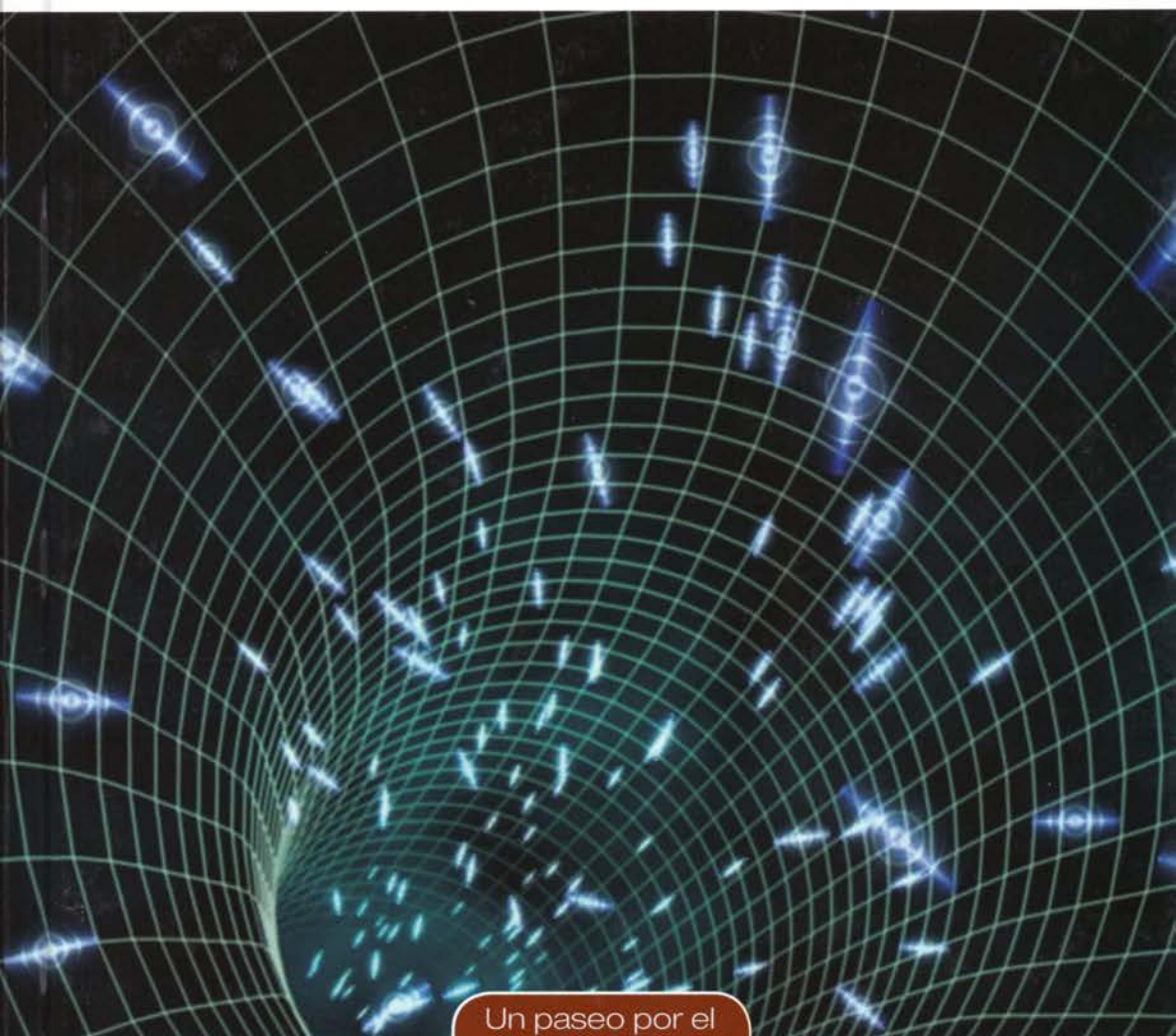


Espacio-tiempo cuántico

En busca de una teoría
del todo



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmureau.blogspot.com/>

Espacio-tiempo cuántico

En busca de una teoría
del todo

RBA

Imagen de cubierta: Una eventual «teoría del todo» armonizará las partículas gobernadas por la cuántica con el espacio-tiempo que alumbró la relatividad.

DIGITALIZADO POR

QS[®] Colecciones

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Arturo Quirantes por el texto

© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.

© 2015, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 63, 114-115; Album: 52-53; Archivo RBA: 139; CERN: 127a; Corbis: 109ad, 109bi; Cynthia Johnson/Getty Images: 109ai; ESA/Hubble: 127b; ESA/NASA/SOHO: 71; Getty Images: 135; Illustrated London News: 75; Jeremy Woodhouse/Corbis: 18-19; Mark Garlick/Getty Images: 130-131; NASA: 97; Science Photo Library/Age Fotostock: 119; SLAC National Accelerator Laboratory: 109bd.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8304-7

Depósito legal: B-16876-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

////////////////////////////////////

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Las fuerzas del universo 13
CAPÍTULO 2	Espacio y tiempo; grande y pequeño 37
CAPÍTULO 3	Una primera unificación: gravedad y electromagnetismo 67
CAPÍTULO 4	Relatividad y cuántica, ¿dos teorías incompatibles? . . 87
CAPÍTULO 5	Hacia la gravedad cuántica 101
LECTURAS RECOMENDADAS	145
ÍNDICE	147

Teoría del Todo. Los físicos describen con este término simple la posibilidad de encontrar algún día una única y gran ecuación que les permita explicar todos los fenómenos de la naturaleza. Será, caso de hallarse, el Santo Grial que pondrá fin a nuestros esfuerzos por intentar comprender el universo, el descubrimiento definitivo tras el cual podremos decir que la ciencia está finalmente completa.

En cierto modo, somos afortunados. Si viviésemos en un universo de leyes cambiantes, donde nunca pudiésemos saber por dónde saldrá el Sol mañana y donde cualquier intento por descubrir patrones o reglas fuese frustrado por caprichos del azar, la ciencia no existiría. Si por el contrario nada cambiase, no tendríamos nada que explicar o predecir y tampoco existiría la ciencia. Felizmente nos encontramos en un universo intermedio en el que las cosas cambian de acuerdo a pautas que podemos desentrañar. Los objetos caen al suelo cuando los soltamos, el Sol siempre sale por la misma zona del horizonte, los gatos siempre tienen gatitos. Al abstraer las regularidades que notamos a nuestro alrededor podemos establecer reglas para describir hechos pasados y predecir sucesos futuros.

Conforme nuestras habilidades experimentales mejoran, ocasionalmente descubrimos fallos a las reglas. La naturaleza parece burlarse de nuestros esfuerzos y se niega a jugar con nuestras normas en esta o en aquella ocasión. La sorpresa invade entonces nuestra mente, igual que sucede al niño pequeño que pulsa el interruptor esperando que la luz se encienda. ¿Qué ha sucedido? ¿Se ha roto la luz? Quizá papá la está arreglando, o la luz ya se ha acabado y hay que comprar más en el supermercado; o puede que haya una regla de juego nueva. De inmediato, buscamos esa regla y la ponemos a prueba, siempre bajo la suposición de que el universo no es caprichoso y sigue actuando según normas definidas. Curiosamente, en ocasiones, mediante un método de tanteo y prueba creamos leyes. Así funciona la ciencia.

Una de las constantes en la búsqueda de la verdad ha sido el impulso de intentar explicar cuantos más fenómenos posibles con cada vez menos reglas, evitando en lo posible dar un tratamiento particular a un fenómeno o proceso concreto. Esta táctica no siempre tiene éxito, pero cuando lo tiene suele convertirse en la antesala de nuevos descubrimientos. La norma de que los objetos caen al suelo cuando los soltamos se rompe con el contraejemplo de un gorrión. Enseguida nos preocupamos por estudiar este caso particular y descubrimos el mundo de los fluidos, la presión y la ecuación de Bernoulli. Ahora también el vuelo de los pájaros tiene una explicación. Hemos aprendido algo más.

Sucede, sin embargo, que nadie sabe cuántas leyes naturales existen. Las constituciones y tratados que han de regir el curso de los acontecimientos naturales se redactan pensando en el contenido y la función, no en el número de epígrafes. ¿Cómo legisla el universo? Tal vez sea una copia a gran escala de nuestro mundo caprichoso que necesita distintas leyes en distintos territorios; o por el contrario, quizá sea un todo unido y armónico, con una carta de naciones esperando en algún lugar a que nosotros la descubramos.

Surge entonces la gran pregunta: si cada vez menos leyes rigen el comportamiento de cada vez más aspectos de la naturaleza, ¿cuántas leyes necesitamos para explicarlo todo? ¿Cien? ¿Diez?

¿Quizá una sola? Averiguar si hay una única ley que lo explique todo, que nos permita hallar todas las respuestas, es uno de los enigmas más profundos a que se ha enfrentado el hombre. Los mejores pensadores han trabajado intensamente en ello durante siglos, y hasta la fecha solamente tenemos una respuesta honrada: no lo sabemos. Nadie lo sabe.

Lo cierto es que el camino hacia la unificación de la física fue siempre largo e incierto. Veremos en este libro las vueltas que ha dado desde los clásicos hasta nuestros días. La tesis aristotélica de los cuatro elementos se basó en deducciones mentales hechas al margen del comportamiento real de la naturaleza, y en ausencia de algo mejor fue aceptada durante cientos de años. Mucho después, en tiempos de la llamada Revolución científica, Galileo Galilei se dio cuenta de que no había necesidad de ángeles o dioses para dotar de explicación al movimiento de los cuerpos celestes. Empezaba el camino para descubrir que no hay leyes del cielo y leyes de la tierra, sino sencillamente leyes, una forma nueva de entender cómo funcionan las cosas en nuestro mundo.

Con la tranquilidad que da el ver los acontecimientos pasados en retrospectiva, la senda que siguieron nuestros predecesores nos parece ahora de una sencillez aplastante. Los fenómenos eléctricos y magnéticos que hoy vemos tan indisolublemente unidos no lo parecían en absoluto cuando se estudiaron por vez primera. Un día alguien descubrió que una brújula cambiaba de dirección cerca de un cable por el que circulaba la corriente eléctrica. ¡Qué experiencia tan enriquecedora hubiera sido poder disfrutar de ese momento! Cincuenta años después, a mediados del siglo XIX, dos siglos después de los grandes descubrimientos de Newton, se consiguió unir la electricidad y el magnetismo gracias a lo que ahora llamamos ecuaciones de Maxwell.

Luego vinieron tiempos fascinantes para ser físico. El electromagnetismo exigía que la velocidad de la luz fuese siempre la misma, ¿pero cómo es eso posible? La luz debería viajar más velozmente si la linterna se mueve, eso era algo de sentido común. Fue entonces cuando los nuevos físicos aprendieron una importante lección: si quieres seguir adelante, debes dejar tu sentido común a la entrada. Quizá por eso Einstein tuvo tanto éxito.

El gran maestro consiguió dejar al margen el sentido común para construir la nueva física. Luchó duramente para conseguir un mundo en el que la velocidad de la luz fuese una constante universal, y lo consiguió. Extendió sus conceptos geométricos del espacio-tiempo para explicar la gravedad más allá de Newton, y también lo consiguió. Su siguiente meta, unificar los campos gravitatorio y electromagnético, parecía un objetivo fácil de alcanzar, casi inevitable. Podemos imaginárnoslo frente a su mesa, temblando de excitación ante la posibilidad de crear por fin la gran teoría única que lo explique todo. Pobre amigo Albert. Jamás lo consiguió y murió intentándolo.

Hay que reconocer que los retos a que se enfrentaron él y sus colegas fueron colosales. Primero apareció la mecánica cuántica con sus probabilidades, sus incertidumbres y sus partículas fantasma; luego fue el turno de la relatividad, sus límites de velocidad, sus agujeros negros y su espacio-tiempo curvo. Por si no era suficiente, aparecieron las interacciones nucleares. De repente, las fuerzas a unificar pasaron de dos a cuatro. Las teorías físicas se fueron haciendo más y más complejas para acomodar un verdadero zoo de partículas y subpartículas que poblaba nuestros colisionadores. Cuerdas, simetrías, branas, rupturas espontáneas, espuma cuántica, universos multidimensionales. Mientras tanto los experimentos diseñados para descubrir los secretos del cosmos nos traen respuestas pero también nos plantean nuevas preguntas.

En la actualidad disponemos de dos grandes conjuntos de leyes para explicar todos los fenómenos del universo. Por un lado tenemos la teoría de la relatividad, por el otro la mecánica cuántica. La primera se concibió para entender por qué la luz siempre tiene la misma velocidad cualquiera que sea el estado de movimiento del observador; la segunda fue impuesta por la necesidad de explicar un conjunto de descubrimientos experimentales a los que la física clásica era incapaz de dar explicación. Ambas teorías han sido elevadas a la categoría de leyes (a pesar de que la inercia nos puede y seguimos llamándolas teorías), y forman parte imprescindible de la física.

Pero a pesar de su indudable valía, y del hecho incontestable de que reproducen gran cantidad de fenómenos naturales con

un grado de precisión altísimo, las teorías de la relatividad y la cuántica adolecen de un grave problema de fondo: no son mutuamente compatibles. Como el agua y el aceite, cada una de esas dos grandes teorías resulta de gran utilidad por sí sola, pero no pueden mezclarse. Los grandes descubrimientos realizados durante el siglo xx se basaron en la suposición de que podíamos utilizar ambas teorías por separado. Cuando las necesitamos a ambas, tenemos un problema.

Como amantes caprichosas, la mecánica cuántica y la relatividad pugnan por conseguir nuestra atención exclusiva, pero el universo las necesita a las dos. ¿Por qué? Muy sencillo: porque rigen nuestras vidas conjuntamente. Por mucho que no podamos entender la combinación de sus elementos, ambas teorías se aplican en cualquier tiempo y lugar, de modo que deben coexistir les guste o no. Eso significa que algún sistema de ecuaciones aún por descubrir nos está esperando para darnos un cuadro completo del comportamiento del universo en que vivimos.

El descubrimiento de la gran teoría única será la constatación definitiva de que los hombres y mujeres que pueblan la pequeña mota azul pálido llamada Tierra pueden aspirar a comprenderlo todo. Es posible que algún día lleguemos a esa meta, pero conviene no dejarse llevar por la arrogancia. En el año 1900, un confiado lord Kelvin anunció que la física era ya un campo completo. La ciencia del nuevo siglo se ocuparía de la obtención de un nuevo decimal en las mediciones, y poco más. Kelvin tan solo vio dos pequeñas nubes oscuras: el resultado negativo del experimento de Michelson-Morley y la catástrofe ultravioleta. Muy pocos años después, esas dos nubecillas se extendieron de tal forma que dieron lugar a la teoría de la relatividad y a la mecánica cuántica.

En cierta ocasión Einstein, cuando niño, deseó saber qué se sentía viajando junto a un rayo de luz. Fue su revelación, la que le llevó de la mano y le dio aliento durante el resto de su vida. Eso le llevó a una vida de búsqueda en pos de lo que él calificó como *conocer los pensamientos de Dios*. Lo demás, decía, es accesorio. En ello siguen sus herederos intelectuales.

El hombre ha recorrido un largo camino para la comprensión del cosmos más allá de la concepción bíblica de ángeles y demo-

nios. Ha descubierto las cuatro fuerzas fundamentales, ha explorado las fronteras de lo infinitamente pequeño y lo infinitamente lejano, ha realizado tentadores esfuerzos para unificar las leyes de la naturaleza, y en estos momentos se encuentra en la frontera de lo desconocido, listo para emprender la búsqueda de la verdad última del universo y el todo.

¿Significa eso que la ciencia nunca dejará de hacer descubrimientos nuevos? La única respuesta que podemos dar hoy a esa pregunta es: nadie lo sabe. Aún.

Bienvenidos a lo desconocido.

Las fuerzas del universo

Antiguamente se creía que la naturaleza estaba controlada por dioses cuyas motivaciones se asemejaban a las humanas. Poco a poco, las interacciones entre los cuerpos fueron identificadas. En la actualidad las hemos reducido a cuatro. ¿Podrá su número reducirse todavía más?

Durante milenios, los seres humanos han intentado comprender el comportamiento del mundo que nos rodea. En un principio, la naturaleza se consideraba cruel y arbitraria, exenta de normas más allá de las relativas a comer y evitar ser comido. Tras los primeros asentamientos permanentes, llegó el auge de las ciudades y los imperios, donde una forma de vida más allá de la pura subsistencia propició que algunas personas se sentaran a reflexionar. Muy pronto, aquellos primeros científicos percibieron patrones de regularidad a su alrededor: el Sol sale todos los días por la misma zona del horizonte, las estaciones se repiten y las estrellas aparecen de forma repetida en el firmamento. Era evidente que el cosmos se regía por unas normas que los hombres no conocían.

Pero averiguar las mencionadas reglas no fue rápido ni sencillo. Las primeras que se descubrieron, limitadas a una ciencia basada en el ensayo y error, estaban ligadas a la supervivencia del grupo: si aplicas esta hierba tus heridas sanarán más rápidamente, si cocinas los alimentos estos perdurarán más tiempo, si añades hojas secas a una hoguera el fuego arderá mucho mejor. En paralelo, se descubrieron nuevos materiales para imponerse

a la naturaleza, cuya importancia queda patente en los nombres con que se bautizaron algunos de los periodos prehistóricos: Edad de Piedra, del Hierro, del Bronce...

El transcurso de la historia conllevó la aparición de sociedades sedentarias cada vez más complejas, algunas de las cuales acabaron siendo grandes imperios. Pronto se hizo evidente que la agricultura estaba íntimamente ligada a los poderes del cielo y eso fue un acicate para el surgimiento de la astronomía organizada. Prácticamente todas las civilizaciones de la Antigüedad construyeron sofisticados observatorios astronómicos para medir el movimiento del Sol y de las estrellas. La motivación no era científica sino práctica: los dioses eran, de algún modo, responsables de que la lluvia cayera y las cosechas prosperasen y, para tenerlos contentos, se efectuaban sacrificios y rituales. Pero una cosa estaba clara. Hacer predicciones meteorológicas, o anunciar un eclipse que hacía desaparecer el Sol del cielo, exigía una serie de conocimientos previos.

Los sacerdotes, en un intento por explicar el comportamiento de la naturaleza (y con el objetivo no menos importante de mantener al pueblo crédulo y controlado), inventaron toda una panoplia de dioses, titanes y otros seres mitológicos a los que achacaron la causa y origen de todo lo que sucedía en los cielos y en la Tierra. Aunque ahora puede resultarnos extraño que los antiguos romanos o los egipcios tuviesen un dios para casi todo, desde la fertilidad hasta el éxito militar, en aquella época era la forma de explicación más sencilla. Los dioses y demonios equivalían a las leyes y fuerzas físicas actuales.

Con el tiempo surgió la ciencia tal y como la conocemos. Pero su desarrollo, clave en la historia del hombre, no tuvo lugar en los imperios, dotados de grandes recursos y en los que ciertos conocimientos científicos (en especial, los astronómicos) eran considerados vitales para la supervivencia de la élite dominante. Carl Sagan, en su obra *Cosmos*, aduce que el conocimiento científico prosperó por motivos políticos y sociales: en los grandes imperios, como el chino o el egipcio, las posturas demasiado conservadoras y tradicionalistas no dieron pie a la innovación. También es posible que las sociedades esclavistas diesen poca

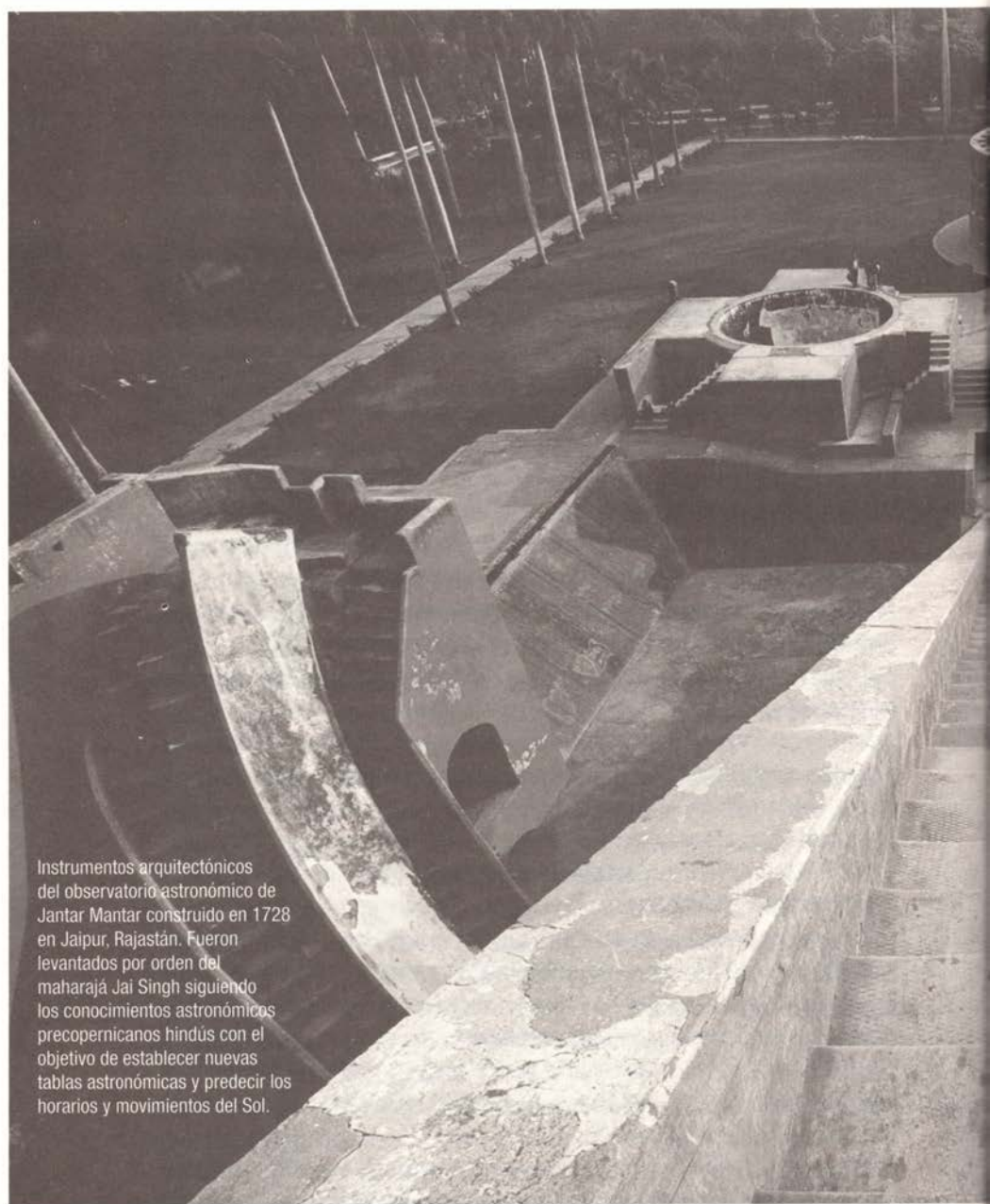
importancia al trabajo necesario para el desarrollo de la experimentación científica.

Así pues, la ciencia nació en el lugar más inesperado: en un conjunto de islas y territorios situados en la esquina oriental del mar Mediterráneo llamado colectivamente Grecia. Hacia el año 600 a.C. comenzaron a despuntar los primeros pensadores científicos. Como los matemáticos Tales de Mileto, Pitágoras y Euclides, el médico Hipócrates, los filósofos Platón y Aristóteles, los físicos Arquímedes y Demócrito o el astrónomo Tolomeo, todos ellos nombres conocidos a día de hoy. Algunas de sus hipótesis, como la de Demócrito y los átomos, fueron confirmadas al cabo de dos milenios; otras leyes antiguas fueron alteradas o finalmente descartadas. Parte de las enseñanzas de esos hombres siguen en vigor a día de hoy, y nuestros hijos continúan aprendiendo en la escuela los postulados de Euclides, el teorema de Pitágoras y el principio de Arquímedes.

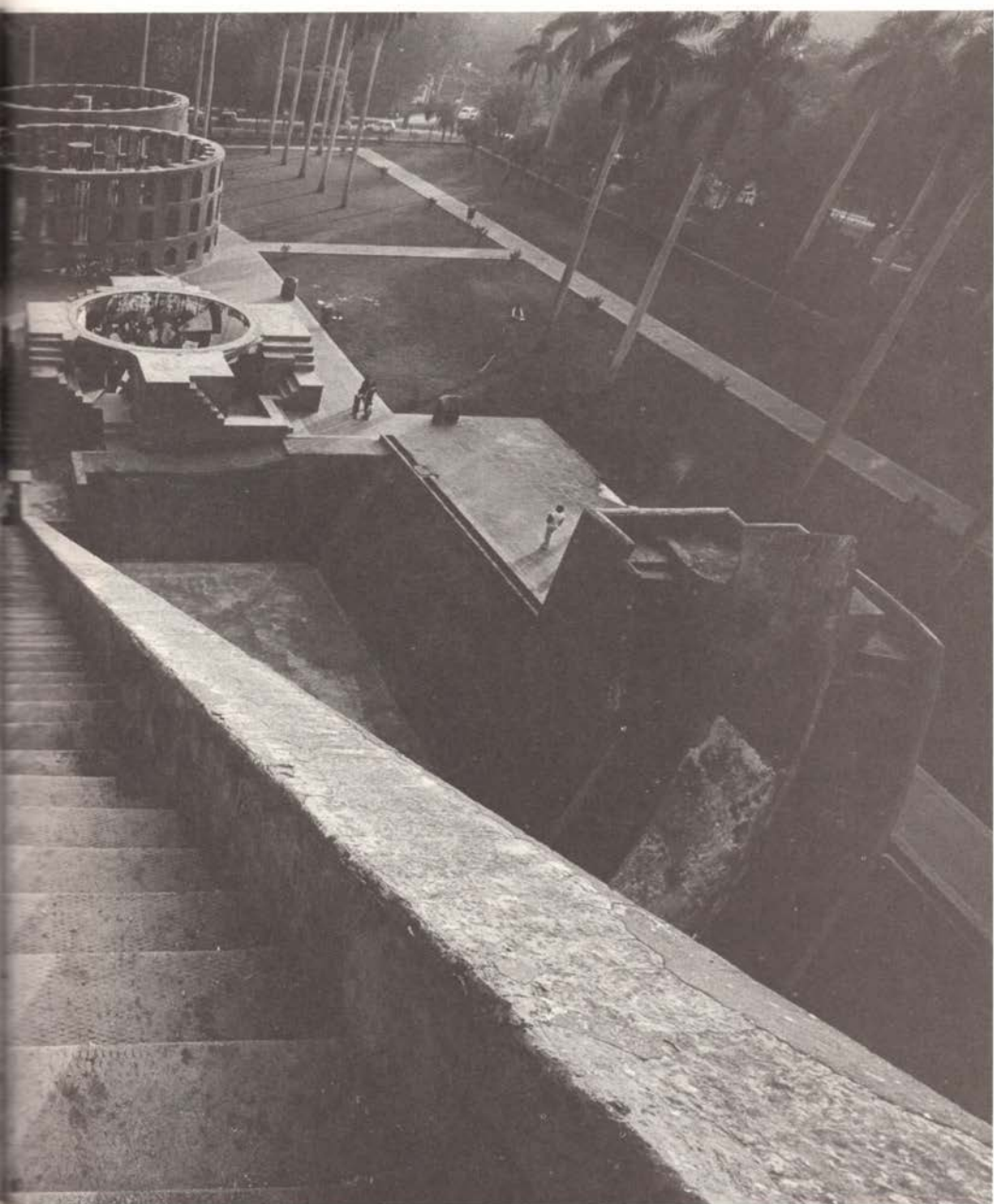
Pero no había una sistematización de los conocimientos antiguos más allá de algunas ideas genéricas. Uno de los primeros hombres que compiló leyes y normas para explicar fenómenos naturales fue el ateniense Aristóteles. Su cosmología geocéntrica, que fue aceptada durante casi dos mil años, postuló la existencia de un universo dividido en dos zonas. La parte central, posteriormente llamada *mundo sublunar*, estaba compuesta por una combinación de cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Más allá se extendía el *mundo supralunar* compuesto por un quinto elemento, denominado *quintaesencia* o *éter*.

En el universo de Aristóteles, la composición de cielo y tierra era diferente y también las leyes que les concernían. El cielo estaba regido por el éter, sustancia sutil e impalpable que se desplazaba en movimientos circulares. En cuanto a la tierra, el sabio griego especuló que los objetos se movían de forma natural hacia un lugar determinado, dependiendo de su composición. Por ejemplo, una roca, constituida sobre todo por tierra, tendería a caer hacia la Tierra, y el humo ascendería, debido a su alto contenido de fuego y aire.

Respecto a los movimientos no naturales, Aristóteles tenía la teoría de que el estado natural de los cuerpos era el reposo



Instrumentos arquitectónicos del observatorio astronómico de Jantar Mantar construido en 1728 en Jaipur, Rajastán. Fueron levantados por orden del maharajá Jai Singh siguiendo los conocimientos astronómicos precopernicanos hindús con el objetivo de establecer nuevas tablas astronómicas y predecir los horarios y movimientos del Sol.



y de que este solo se movería durante la aplicación de una fuerza. Hasta cierto punto resulta un planteamiento lógico, pues está basado en la experiencia cotidiana: cualquier objeto en movimiento —un coche, un balón de deportes, una piedra lanzada al aire— tiende a frenarse.

Ahora sabemos que eso es debido a la existencia de las fuerzas de rozamiento, pero la costumbre de ver objetos que se paran hace que, incluso en nuestros días, las personas con poca formación científica crean que «lo natural» es que un cuerpo permanezca inmóvil. Aristóteles postuló que existe siempre una fuerza de resistencia al movimiento. Esta fuerza es real en el caso de los objetos que se mueven con fricción, pero él la asumió como norma general para cualquier caso.

Aunque el método de observación, experimentación y formulación que empleó Aristóteles no dio los resultados correctos, mostró el camino a seguir a los científicos posteriores. Sin embargo, desafortunadamente, la práctica del pensamiento científico desaparecería pronto de escena. Grecia cayó ante unos imperios circundantes poco dados a las elucubraciones de la ciencia (en particular, el práctico Imperio romano, más inclinado a la ingeniería que a la ciencia pura) y a la caída del Imperio romano de Occidente prosiguió un milenio de Edad Oscura durante el cual la ciencia y el pensamiento crítico quedaron relegados al olvido. Tuvieron que pasar dos mil años tras el nacimiento de Aristóteles para que los hombres se atreviesen, por fin, a desafiar las enseñanzas del célebre pensador griego.

NEWTON, EL PRIMER GRAN UNIFICADOR

El físico inglés Isaac Newton ha sido, posiblemente, el científico más influyente de la historia, junto a Darwin y Einstein. Prácticamente no hay campo de la física en que no realizase contribuciones de gran valor: inventó el cálculo diferencial e integral (de forma independiente pero simultánea a Gottfried Leibniz), fundó la mecánica clásica a partir de las tres famosas leyes que aún hoy siguen en vigor, y realizó importantes descubrimientos en ópti-

LA MANZANA Y LA LEY DE LA GRAVEDAD

La historia de Newton, aunque cierta, se suele contar de forma algo tergiversada. Es verdad que Newton se encontraba descansando bajo un manzano en el jardín de su casa cuando, de repente, vio caer una manzana al suelo. Lo que no es verídico es que le impactara de pleno en la cabeza. Pero ¿qué importancia tiene eso, al fin y al cabo? Lo esencial es que, cuando alzó la mirada y vio la luna en el cielo, tuvo su gran «momento eureka». Un momento que repercutió profundamente en el devenir de la humanidad. Pero vayamos más allá. Tras demostrar que es la misma acción la que causa la caída de objetos en la Tierra hacia su centro y la de la Luna en su órbita, surgió una primera pregunta: ¿por qué la Luna no «cae»? Pues, en realidad, sí que «cae», descubrió el físico. Lo que sucede es que, al mismo tiempo, le afecta la forma de la Tierra. Newton lo ilustró con la idea de un cañón que dispara una bala en horizontal desde lo alto de una montaña. A mayor velocidad, más lejos caerá la bala. Pero llegará un momento en que la propia superficie terrestre (curva, no lo olvidemos) «caerá» a igual ritmo que la bala. En ese momento, la bala se convertirá en un satélite que, a diferencia de la Luna, será de origen artificial. La segunda pregunta es: ¿cómo varía la fuerza con la distancia? Recordemos que la segunda ley de Newton de la mecánica afirma que la fuerza es proporcional a la aceleración. Sabemos que la manzana cae con una aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$. Y que la aceleración de la Luna es de tipo centrípeta, lo que puede escribirse de esta forma:

$$a = \frac{v^2}{r} = \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^2 \frac{1}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

donde T es el periodo de la órbita de la Luna alrededor de la Tierra y r es la distancia del centro de la Tierra al de la Luna. Sustituyendo los valores $T=2360600$ segundos y $r=384400000$ metros, obtenemos un valor de $0,00272 \text{ m/s}^2$.

Una luna y una manzana

Está claro que la aceleración gravitatoria varía con la distancia, pero... ¿cómo interactúan? Para saberlo, dividiremos la distancia Tierra-Luna entre la distancia Tierra-manzana, lo que nos dará un valor aproximado de 60; a esa distancia, la aceleración gravitatoria es unas 3600 veces menor. Como el número 3600 es el cuadrado de 60, nos sugiere que la aceleración, y por tanto la fuerza, decrece a un ritmo igual al inverso del cuadrado de la distancia: $F \sim 1/r^2$

La fruta inspiradora

Ciertamente, la historia de la manzana dio lugar a una leyenda, pero el manzano existe y continúa dando sombra en Woolsthorpe Manor, en Reino Unido, lugar de nacimiento de Isaac Newton. A medio mundo de distancia, otros manzanos inspiraron a Steve Jobs a bautizar su nueva empresa con el nombre de su fruta: *Apple*. En 1987 uno de los productos estrella de la marca fue un asistente digital personal popularizado con el término PDA (*Personal Digital Assistant*) que se vendió durante doce años con el nombre de... ¿lo adivinan? Sí: *Newton*.

ca, terminología, sonido y mecánica de fluidos. Pocas ramas de la física quedaron fuera de su alcance.

Pero una de sus mayores hazañas suele pasarse por alto: la unificación de los fenómenos que tienen lugar en el cielo y en la Tierra. Desde antiguo se asumía como un hecho que la Tierra, poblada por gentes pecaminosas e imperfectas, estaba regida por leyes de naturaleza y forma diferentes a las del cielo, que se suponía armonioso y perfecto, no en vano era la sede y obra del Creador Eterno. La herencia aristotélica pesaba mucho. Pocos se atrevían a imaginar que las leyes de ambos mundos eran realmente las mismas, y los que lo intentaron pagaron cara su osadía a manos de la Iglesia católica. Fue en la Inglaterra del siglo xvii, más indulgente con las persecuciones religiosas que la Iglesia de Roma, donde pudo gestarse el pensamiento de un hombre cuyo genio osó imaginar que había un solo conjunto de reglas para todo el universo.

Según relató Newton en una ocasión, la caída de una manzana le hizo reflexionar sobre el motivo por el que siempre caía de forma vertical. Al levantar la mirada y ver la Luna en el horizonte diurno, tuvo una revelación; una gran idea a partir de la cual el muro conceptual que separaba el mundo sublunar del supralunar desapareció. Del mismo modo, se desvaneció la necesidad de invocar la intervención de seres divinos, poderosos y caprichosos para explicar el movimiento de los cuerpos celestes.

La exitosa ley de Newton de gravitación universal fue el primer intento de describir la forma en que los cuerpos se atraen en virtud de su masa. Aunque inicialmente fue formulada para dos masas puntuales, Newton se encargó de demostrar su validez para el caso de masas esféricas. Planteó una relación de gran sencillez y eficacia que explica, de forma casi perfecta, el movimiento de los cuerpos en el espacio, donde las fuerzas de rozamiento o las electromagnéticas no suelen estorbar como lo hacen en la Tierra. Aun en nuestros días, constituye una excelente primera aproximación a la interacción gravitatoria.

Algunos aspectos de esta ley fueron un misterio incluso para su propio creador. En particular, Newton consideraba «un gran absurdo» el hecho de que un cuerpo pueda ejercer una influen-

cia sobre otro. Todavía hoy la experiencia cotidiana parece querer demostrar que, para poder mover un cuerpo, es necesario un contacto físico; el concepto de acción a distancia suele ser difícil de aceptar. Varios autores propusieron entonces teorías alternativas, basadas en la existencia de una sustancia sutil e impalpable, el éter, hipótesis que fue descartada hace más de un siglo.

La ley de Newton de gravitación universal, formulada a mediados del siglo XVII, permaneció en vigor hasta finales del siglo XIX, cuando las mejoras en la precisión de las medidas astronómicas permitieron calcular pequeños efectos inexplicables. La hazaña de plantear una descripción del cosmos tan sencilla y a la vez tan eficaz durante casi un cuarto de milenio dice mucho del genio de su creador. Pero por encima de ello es un testimonio de la sencillez y universalidad de las leyes de la naturaleza. Tras Newton, generaciones enteras de científicos siguieron esos mismos principios para seguir profundizando en la comprensión de las leyes que rigen el universo.

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO: LA UNIÓN HACE UNA GRAN FUERZA

La fuerza gravitatoria ha acompañado al hombre desde siempre, amoldando su comportamiento y limitando sus movimientos. Hizo falta que apareciera Newton para explicarla, pero estamos muy acostumbrados a ella. Sus efectos son patentes en nuestras vidas desde el momento en que damos nuestros primeros pasos. Unidos a la superficie de la Tierra gracias a la interacción gravitatoria, habitamos en un planeta que, de forma ineludible, también gira en torno al Sol, atraído por esa fuerza fundamental.

Asimismo, existen otros tipos de fuerza que nos han acompañado desde siempre. Por un lado, están los rayos que caen durante una tormenta y las pequeñas chispas que aparecen en un trozo de ámbar cuando lo frotamos con un trozo de lana; por otro, la aguja imantada que apunta siempre en una dirección fija y la atracción que se da entre el hierro y el mineral llamado

magnetita. Ambos fenómenos, conocidos desde la Antigüedad, se habían considerado meras curiosidades, fruto, quizá, del caprichoso comportamiento de los dioses.

Con el advenimiento de la Ilustración, la ciencia, esa nueva herramienta para la comprensión del mundo, fue aplicada a esos y otros fenómenos desconocidos. La botella de Leyden (considerada el primer condensador eléctrico) y la cometa de Benjamin Franklin (gracias a la cual el inventor constató que los rayos son descargas eléctricas) son tan solo dos ejemplos de la gran cantidad de esfuerzo y talento que se desplegó en el siglo XVIII para intentar entender los fenómenos eléctricos. El proceso culminó en 1785 con la ley de Coulomb de la electrostática, análoga, en forma y efectos, a la ley de gravitación de Newton.

Sin embargo, entender el magnetismo llevó algo más de tiempo. Mientras que en la electricidad hay dos cargas de distinto tipo, el magnetismo no está generado por «cargas magnéticas» puntuales. No fue hasta el comienzo de la década de 1820 cuando el danés Hans Christian Oersted observó que una corriente eléctrica producía una fuerza sobre una aguja imantada. Poco después, se descubrió que las corrientes eléctricas son fuentes del magnetismo lo que, unido a la observación de que las propias cargas eléctricas sienten fuerzas magnéticas en determinadas condiciones, reveló un hecho de gran trascendencia: la electricidad y el magnetismo no son fenómenos independientes.

La búsqueda de las relaciones entre fenómenos eléctricos y magnéticos continuó. El siguiente paso del razonamiento fue preguntarse si, dado que la electricidad produce magnetismo... ¿acaso el magnetismo también produce electricidad? La respuesta es afirmativa. La ley de inducción de Faraday explica cómo un campo magnético de flujo variable en una región del espacio puede producir un campo eléctrico. Gracias a este descubrimiento tan relevante, hoy podemos tener electricidad en nuestras casas (la humanidad genera casi toda la corriente eléctrica por ese procedimiento) y hemos desarrollado las infraestructuras de telecomunicaciones.

La unificación electricidad-magnetismo se considera completa desde la década de 1860, cuando el físico escocés James Clerk

¿QUÉ ES UN METRO?

¿Sabían que una de las consecuencias de la teoría especial de la relatividad fue una nueva definición del metro? Repasemos su historia: Cuando fue creado a finales del siglo XVIII, el metro, principal unidad de longitud del Sistema Internacional de Unidades, fue definido como la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre que pasa por París. Dada la dificultad de medir un arco de meridiano desde cualquiera de los dos polos hasta el ecuador, el Gobierno francés patrocinó una expedición para medir la distancia entre Dunkerque (Francia) y Barcelona (España) y esas mediciones sirvieron de base para instaurar el metro, término que procede del término griego *metron*, que significa medida. Como otras unidades de medida, el metro nació al calor de la Revolución francesa, y aunque inicialmente los ingleses fueron reacios a su uso, tras casi un siglo, se alcanzó un acuerdo internacional para utilizarlo como unidad de medida oficial.

El metro-patrón

Para evitar la engorrosa tarea de medir arcos de meridiano, se crearon varios metros-patrón hechos de una aleación de platino e iridio. Con el tiempo, se hizo patente la incomodidad de definir el metro en virtud de un objeto físico concreto. Para mejorar su definición, se recurrió al hecho de que ciertas sustancias emiten luz en longitudes de onda muy concretas. Así, en 1960 la definición del metro pasó a ser la longitud de onda de la emisión anaranjada del átomo de kriptón-86 multiplicada por el número 1 650 763,73. La cifra parece caprichosa, pero fue escogida cuidadosamente para que el metro nuevo tuviese la misma longitud que el antiguo.

Mejorando la precisión

Aunque la incertidumbre en la definición del metro es muy pequeña, se persigue la obtención de unidades lo más exactas posible. Se trata de que dos laboratorios, usando los mismos procedimientos, obtengan metros cuyas longitudes sean el máximo de parecidas. Para ello, fue muy útil constatar que los intervalos de tiempo se podían medir con mucha más precisión que los intervalos de longitud, lo que se descubrió gracias a la relatividad especial de Einstein, que postuló que la velocidad de la luz en el vacío (c) es constante. Utilizando la relación $c=L/T$, no hay más que medir la velocidad de la luz de la forma más exacta posible y relacionar el metro con la distancia recorrida por la luz en una fracción determinada de segundo.

El metro contemporáneo

En la actualidad, se ha fijado un valor para la velocidad de la luz igual a 299 792 458 metros por segundo. Eso permite definir el metro como *la distancia recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo igual a 1/299 792 458 segundos*. De ese modo, el nuevo metro coincide con el anterior, la velocidad de la luz en el vacío tiene una definición exacta y un principio de la relatividad especial ha pasado a ser considerado un hecho fundamental.

Maxwell publicó las ecuaciones que llevan su nombre. Reformuladas tras la revisión que llevó a cabo Oliver Heaviside, las ecuaciones de Maxwell describen el origen y la evolución de los campos eléctrico y magnético, y constituyen el primer ejemplo (con el permiso de Newton) de la unificación de dos fuerzas que anteriormente se creían independientes.

Uno de los resultados más llamativos de las ecuaciones de Maxwell es que muestran la forma en que una perturbación de los campos eléctrico y magnético viaja por el espacio, lo que hoy

conocemos como onda electromagnética. Dependiendo de la frecuencia con la que oscile dicha perturbación, se generan ondas de radio, microondas, rayos X o gamma. Tras medir la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío, se comprobó que se

La ignorancia total y consciente es el preludio de un avance real en la ciencia.

JAMES CLERK MAXWELL

mueven siempre a un valor constante, independientemente de su frecuencia o energía.

Pero más sorprendente aún fue el descubrimiento de que su velocidad era idéntica a la de la luz, lo que provocó una conclusión rotunda: la luz no es más que otra forma de onda electromagnética. De un golpe, las fuerzas eléctricas y magnéticas quedaron unificadas con los fenómenos responsables de la luz. Por ello, las propiedades típicas de la luz, como la polarización (una onda polarizada es aquella que oscila en una determinada orientación) o la refracción (una onda cambia su dirección cuando cambia de un medio a otro), se manifiestan también en las ondas de radio o las microondas y, en el sentido inverso, las ondas de luz visibles pueden estudiarse como ondas electromagnéticas que interaccionan con la materia.

A fecha de hoy, la unificación de las fuerzas eléctrica y magnética descrita en las ecuaciones de Maxwell permanece incólume. Ni siquiera la teoría de la relatividad consiguió afectarla. Todo lo contrario: uno de los motivos más poderosos que tuvo Einstein para desarrollar una nueva teoría fue conseguir que las ecuaciones de Maxwell fuesen válidas para todos los observadores, particularmente en lo que hace referencia a la constancia en

la velocidad de las ondas electromagnéticas, también conocida como la velocidad de la luz.

En la actualidad, se acepta sin discusión el hecho de que la luz viaja por el vacío siempre a la misma velocidad, independientemente del estado de movimiento del observador.

LAS FUERZAS NUCLEARES: EL PODEROSO VÍNCULO ENTRE PARTÍCULAS

El desarrollo del electromagnetismo fue un doble triunfo para la física del siglo XIX. Además de sintetizar todos los fenómenos eléctricos y magnéticos conocidos en un solo conjunto compacto de ecuaciones, la nueva teoría brindó la oportunidad de realizar nuevos descubrimientos. El hallazgo del carácter electromagnético de la luz no fue más que uno de ellos.

Dos siglos antes, Newton había postulado su ley de gravitación universal para dar cuenta cumplida de las interacciones gravitatorias; ahora, Maxwell lograba completar la descripción del electromagnetismo. Esas dos interacciones fundamentales iban a permitir, por fin, explicar todos los fenómenos naturales. Porque cualquier fuerza que exista en la naturaleza, sea el rozamiento de un pájaro con el aire, la elasticidad de un muelle o la cohesión que mantiene una roca unida, puede esclarecerse en virtud de ambas.

Ciertamente, las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas difieren en aspectos esenciales. Aunque ambas tienen un radio de acción aparentemente infinito, la gravedad es siempre atractiva, en tanto que las fuerzas eléctricas pueden ser atractivas o repulsivas. Las cargas eléctricas son de dos tipos, que Benjamin Franklin bautizó como positivas y negativas; las masas gravitatorias, en cambio, son de un solo tipo. Las cargas eléctricas del mismo tipo se repelen, las gravitatorias se atraen. Y mientras que las partículas con carga eléctrica están sometidas a fuerzas que dependen de su propia velocidad, a las partículas con masa eso no les sucede.

Con todo, la gravitación de Newton y el electromagnetismo de Maxwell parecían cubrir todo el espectro de fenómenos de

la naturaleza. Nada había ya que no pudiese ser explicado en su aspecto más básico. No es de extrañar, pues, que algunos científicos de finales del siglo XIX, con lord Kelvin a la cabeza, pronosticaran el fin de la física.

Pero, sin duda, pecaron de imprudencia. Fue en 1897 cuando se descubrió la existencia de una partícula minúscula que llamamos electrón y, en los años siguientes, los físicos usaron esta nueva partícula como una minúscula bala que, al ser disparada contra un átomo, podía proporcionar información sobre su tamaño y estructura. Las diferentes teorías que estaban siendo desarrolladas sobre la estructura del átomo podrían ser puestas a prueba. Una de ellas parecía explicar los resultados experimentales particularmente bien: se trata del modelo planetario, que todavía hoy se enseña a los niños en las escuelas.

Propuesto a comienzos del siglo XX por el físico inglés de origen neozelandés Ernest Rutherford, el modelo planetario del átomo consta de un núcleo con carga positiva en torno al cual giran electrones con carga negativa, como si fueran planetas siguiendo sus órbitas alrededor de una estrella. Los experimentos posteriores mostraron que el modelo debía ser refinado, y el núcleo pasó de ser una entidad homogénea e indivisible a estar compuesto por partículas, algunas de ellas con carga eléctrica positiva, llamadas protones, y otros sin carga: los neutrones (figura 1).

Pero entonces surgió una duda. Si el núcleo era de tamaño tan pequeño, las fuerzas de repulsión entre los protones (de igual carga) deberían ser enormes. ¿Qué fuerza explicaba que el núcleo permaneciera unido? Las fuerzas electrostáticas, como las gravitatorias, crecen sin límite para distancias tendentes a cero. Por ello, si colocamos dos protones de forma que se toquen, la fuerza de repulsión es superior al peso de un chico de diez años. Aunque la existencia de neutrones permite que los protones estén algo más separados, la repulsión electrostática debería separar los protones de inmediato, ya que ni la atracción gravitatoria ni el efecto de los electrones pueden mantener el núcleo unido. No pueden existir núcleos atómicos estables en esas circunstancias.

Así pues, se hizo necesario postular la existencia de un nuevo tipo de fuerzas. La idea no fue del agrado de la comunidad cientí-

fica, acostumbrada a explicar todo tipo de fenómenos naturales en base a las dos ya conocidas, pero no había otra opción. La nueva fuerza debía tener un alcance limitado, ya que no parecía manifestarse más allá del núcleo del átomo y, al mismo tiempo,

FIG. 1

El modelo atómico de Bohr, también llamado de Bohr-Rutherford, fue propuesto en 1913 y se basó en un átomo de hidrógeno. En él, Niels Bohr introdujo el concepto de cuantización de Planck y Einstein.

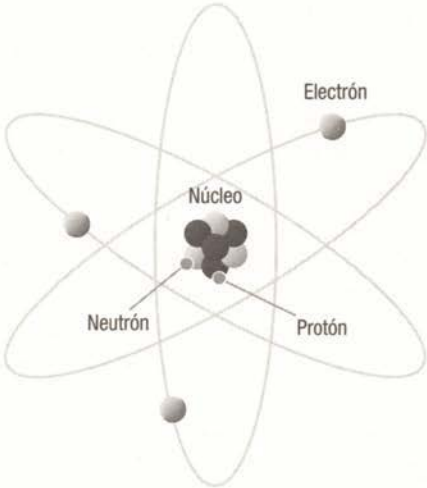
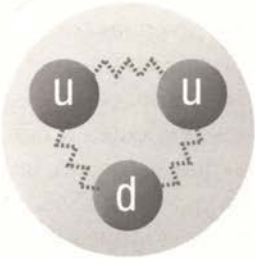
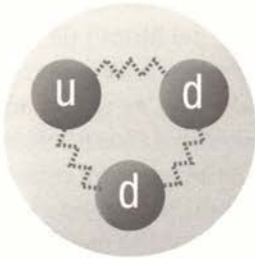


FIG. 2



Hadrón de un protón



Hadrón de un neutrón

Los quarks componen hadrones y se mantienen unidos por la interacción nuclear fuerte. En la imagen a la izquierda, quarks en el interior de un protón (*up, up y down*) y, a la derecha, de un neutrón (*up, down y down*). *Up* y *down* es el nombre que reciben estos tipos de quark.

tenía que ser lo bastante intensa como para vencer la repulsión eléctrica entre los protones.

La nueva fuerza, llamada *fuerza nuclear fuerte*, fue comprendida cuando el físico japonés Hidero Yukawa explicó la desintegración beta en 1935, lo que le valió el premio Nobel de Física en 1949. En definitiva, la fuerza nuclear fuerte es una interacción que aparece entre hadrones, una clase de partículas del mismo grupo al que pertenecen el protón y el neutrón. Se trata de una fuerza de muy corto alcance, apenas superior al propio radio del núcleo atómico, lo que contrasta con las fuerzas gravitatoria y electromagnética, de alcance infinito.

Desde entonces, se ha descubierto que protones, neutrones y otras partículas similares se componen de otras subpartículas denominadas quarks. Los modelos actuales de física de partículas describen la fuerza nuclear fuerte entre hadrones como resultado de una fuerza similar a la que actúa entre los quarks (figura 2), y que recibe el nombre de *interacción fuerte*. Sea cual sea su descripción, la fuerza nuclear fuerte explica por qué el núcleo no se repele a sí mismo a causa de las fuerzas electroestáticas.

La necesidad de explicar la estabilidad del núcleo del átomo obligó a los físicos a extender el conjunto de fuerzas fundamentales conocidas de dos a tres. Se trató de un paso atrás en los intentos por describir una teoría de fuerzas unificada pero, aun así, era un precio razonable a pagar a cambio de poder explicar la estructura del átomo de forma satisfactoria. Los físicos podrían acostumbrarse a vivir con tres fuerzas en el universo.

El problema es que tampoco resultaron ser suficientes, porque el estudio de los núcleos radiactivos indica que éstos pueden encaminarse hacia un estado estable emitiendo radiación de tres tipos. Por un lado existe la radiación alfa, compuesta por un núcleo de helio (dos neutrones y dos protones), por otro la radiación gamma (esencialmente, rayos X de alta energía), y hay un tercer tipo de radiación llamada beta. Durante la emisión de radiación beta, un neutrón se desintegra dando como resultado un protón, un electrón y una tercera partícula llamada antineutrino.

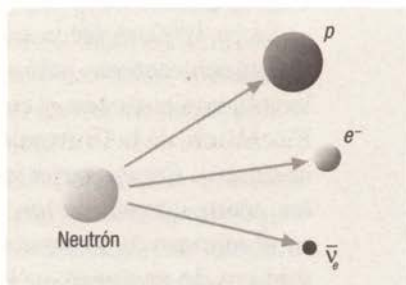
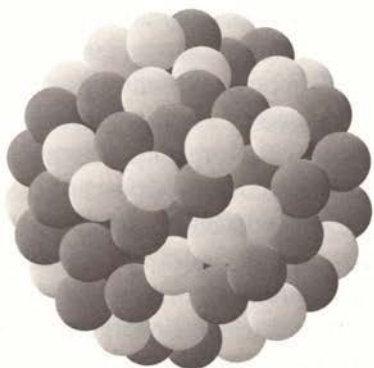
Ninguna de las fuerzas conocidas hasta el momento, ni la gravitatoria, ni la electromagnética ni la nuclear fuerte, era capaz

MISTERIO EN LA DESINTEGRACIÓN BETA

La transformación de ciertos núcleos radiactivos y el proceso de desintegración beta conllevó un descubrimiento. El análisis de los subproductos resultantes de la desintegración de un neutrón mostró que las partículas generadas (protón y electrón) tenían una masa + energía inferior al neutrón original, lo que llevó a sugerir que quizá la energía no se conserva sino que tiende a disminuir, tal y como la entropía, medida del desorden, es propensa a aumentar. En 1930 el físico austríaco Wolfgang Pauli propuso lo que calificó como «remedio desesperado». Durante la desintegración beta se creaba una tercera partícula que absorbía la energía que parecía faltar. ¿Una partícula que ellos no podían detectar?, se indignaron los experimentadores. Solo una partícula fantasma, con masa muy pequeña y sin interacción con la materia, resolvería el enigma de la energía desaparecida. En circunstancias menos favorables, una hipótesis tan descabellada no hubiera prosperado, pero Pauli era una de las figuras más relevantes en el nuevo campo de la mecánica cuántica y, además, a nadie se le ocurría otra alternativa mejor.

Los pequeños neutrones

Así nació la idea de que existía una tercera partícula, resultante de la desintegración beta, que el científico Enrico Fermi bautizó como neutrino (el pequeño neutro). Pero la conjetura de Pauli no fue confirmada hasta que un cuarto de siglo después un neutrino fue detectado por primera vez. Hoy sabemos que un neutrón puede desintegrarse y generar un protón, un electrón y un neutrino; siendo minuciosos, un antineutrino electrónico. Hasta la fecha, el principio de conservación de la energía ha sido comprobado en todas las situaciones. Si algún día un experimento lo contradice, habrá que replanteárselo. Aunque quizá sea la antesala de un nuevo descubrimiento, como sucedió con el neutrino de Fermi.



Proceso de desintegración beta en un núcleo atómico inestable. Un neutrón se desintegra creando un protón (p), un electrón (e^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}_e$).

de explicar esa desintegración beta. Es como cuando aparece un invitado no deseado a una boda y no puede sentarse en ninguna mesa porque no pertenece a ninguna de las categorías de invitados. Sin embargo está invitado y hay que atenderlo. Lo único que se puede hacer es montarle una mesa especial para él solo, y eso fue lo que hicieron los físicos nucleares.

Una vez más, la necesidad de explicar fenómenos nuevos forzó el postulado de un nuevo tipo de fuerza fundamental, la cuarta, a la que se llamó *fuerza nuclear débil*. Se trata de una interacción cuyo alcance es inferior a la milésima parte del radio de un protón. Se manifiesta durante la desintegración beta, participa en la creación de elementos pesados, y poco más. Carece de la grandeza de las grandes fuerzas de alcance infinito, pero a pesar de eso ahí está. Es la cuarta de las fuerzas fundamentales del universo.

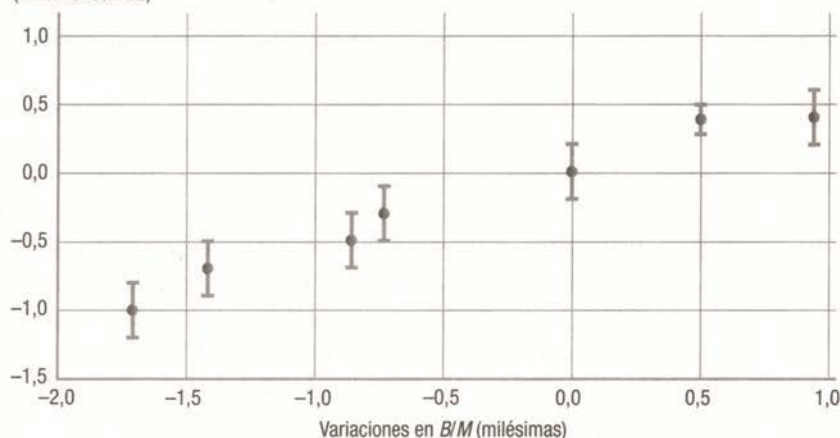
¿EXISTE UNA QUINTA FUERZA? LAS PRUEBAS DE EÖTVÖS Y FISCHBACH

La ley de gravitación universal de Newton demuestra la caída a idéntica aceleración de todo tipo de cuerpos, con independencia de su masa. Una pluma cae más lentamente que un martillo porque la atmósfera terrestre proporciona una fuerza de frenado. En ausencia de aire, ambos caerán de idéntica forma, como comprobó el astronauta David Scott en 1971 en la superficie lunar.

Ya en 1900, el físico húngaro Loránd Eötvös estableció que la fuerza gravitatoria actúa igual, sea cual sea la composición de los objetos que caen, y en 1986, científicos dirigidos por Ephraim Fischbach, de la Universidad de Washington, analizaron de nuevo sus datos. Compararon las pequeñas diferencias que había entre las aceleraciones de los cuerpos con el cociente B/M , donde B es el número de protones + neutrones de cada cuerpo y M es el número de protones + electrones que tendría una masa igual de átomos de hidrógeno. Ese cociente es aproximadamente —pero no igual a— uno, y toma diversos valores dependiendo del material utilizado. Los investigadores descubrieron leves discrepancias en los datos de Eötvös (figura 3), lo que les llevó a sugerir que

FIG. 3

Variaciones de la aceleración
(milmillonésimas)



Resultados del experimento de Eötvös analizados por el equipo de Fischbach. Las pequeñas discrepancias (las barras representadas en los puntos del gráfico) que se observan al comparar la aceleración de los cuerpos y el cociente B/M incitaron a añadir un término a la expresión de la energía potencial clásica.

la energía potencial gravitatoria newtoniana debía ser modificada mediante la adición de un nuevo término de alcance bastante corto (algunos cientos de metros) que los autores identificaron como una «quinta fuerza», que se añadía a la gravitatoria, la electromagnética y a las dos fuerzas nucleares. Pero los errores en los parámetros que acompañaban la nueva ecuación, mostraron valores inquietantemente elevados que, al menos en parte, procedían de los cometidos por el propio Eötvös.

Es normal que, durante un experimento científico, el instrumental, el experimentador o las condiciones ambientales produzcan fallos. Eötvös determinó la equivalencia entre aceleraciones con una precisión de una parte en mil millones, y sus mediciones, en los límites de la sensibilidad instrumental, conllevaron errores experimentales a veces tan grandes como las propias mediciones. János Renner realizó un experimento similar en 1935 y sus datos mostraron valores de aceleración idénticos

dentro de esos límites de error. Otros grupos han realizados sus propios experimentos con el mismo resultado. Probablemente, la quinta fuerza de Fischbach no sea más que una ilusión.

LA ANTESALA DE LA NUEVA FÍSICA

Hoy por hoy, todas las interacciones observadas en el universo pueden explicarse únicamente en virtud de cuatro tipos de fuerzas: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. Si encontrásemos una excepción, mañana tendríamos que postular la existencia de una quinta fuerza, pero por ahora no ha sido necesario. La tendencia es la opuesta: reducir en lo posible el número de interacciones.

Fue Maxwell quien, en 1860, inició el camino de la unificación de las fuerzas al proporcionar una explicación única al conjunto de las fuerzas eléctricas y magnéticas. El próximo avance no tuvo lugar hasta más de un siglo después, cuando el pakistaní Abdus Salam y los norteamericanos Sheldon Glashow y Steven Weinberg desarrollaron la teoría electrodébil, que une la fuerza electromagnética con la interacción nuclear débil.

El resultado de esa unificación fue toda una sorpresa para la comunidad científica. Y es que, durante todo el siglo xx, las mejores mentes se dedicaron al problema de unificar las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias y, a pesar de que ambas tienen algunos rasgos comunes (el más notable, su alcance infinito), todos los intentos por unificarlas se habían saldado con un fracaso. En cambio, la unificación del electromagnetismo con la fuerza nuclear débil constituyó un maridaje inesperado pero eficaz, lo que abrió la esperanza a conseguir la unificación definitiva con las otras dos fuerzas (gravedad e interacción nuclear fuerte), un objetivo que, por el momento, parece muy lejano y difícil de alcanzar.

¿Cuál es la dificultad? Desde Maxwell hasta ahora la física ha sufrido una doble revolución. De forma casi simultánea, la ciencia de los cuerpos muy pequeños y la de los muy grandes sufrió una gran transformación. No solo aparecieron nuevos fenóme-

nos que requerían explicación sino que la propia forma de hacer física cambió. Hoy, el mundo ordenado y continuo de Newton y sus contemporáneos ha desaparecido, y ha sido sustituido por una concepción en la que el espacio ya no es continuo porque sufre distorsiones. Por tanto, la certeza absoluta respecto a las mediciones ha dejado de existir.

Se trata del nuevo mundo de la mecánica cuántica y la relatividad, paradigma de la nueva física que comenzó a desarrollarse a inicios del siglo xx. Irónicamente, surgió en un tiempo en que se creía que esta disciplina ya estaba totalmente desarrollada. Un tiempo en el que se creía que, salvo en algunos aspectos, todos los fenómenos ya habían sido bien explicados.

Espacio y tiempo; grande y pequeño

Con la llegada del siglo xx los físicos se enfrentaron a nuevos retos en los reinos de lo muy pequeño y de lo muy veloz. Las soluciones propuestas —mecánica cuántica y relatividad— entraban en colisión con los postulados de la mecánica clásica que se habían aceptado durante siglos, al tiempo que contradecían todo lo que nos dictaba el sentido común.

A finales del siglo XIX uno de los campos científicos que estaban en apogeo era el estudio de la radiación térmica, que es la que emite un cuerpo a consecuencia de su temperatura, y que se manifiesta mediante ondas electromagnéticas. Para determinar de forma teórica cómo se repartía la radiación entre las frecuencias posibles (lo que se denomina en términos técnicos *la distribución espectral de un cuerpo radiante*) se utilizó la muy exitosa teoría electromagnética de James Clerk Maxwell.

La teoría explicaba bien los resultados observados en la zona de bajas frecuencias (correspondiente a microondas, infrarrojos y ondas de radio), pero fallaba estrepitosamente en el dominio de las altas frecuencias, donde se predecía que la cantidad de energía radiada debería crecer infinitamente (figura 1). A este resultado, absurdo y grotesco, se le dio el nombre de «catástrofe ultravioleta». Cuando en 1900 el eminente físico británico William Thomson, más conocido como lord Kelvin, se atrevió a pronosticar el fin inminente de la física debido a que ya había logrado explicar satisfactoriamente todos los fenómenos, admitió que, no obstante, existían aún «dos pequeñas nubes oscuras». Una de ellas era, precisamente, esa catástrofe ultravioleta, que él confiaba que la

física de la época lograría explicar. Sin embargo no fue así y hubo que volver a examinar las teorías al uso desde sus cimientos.

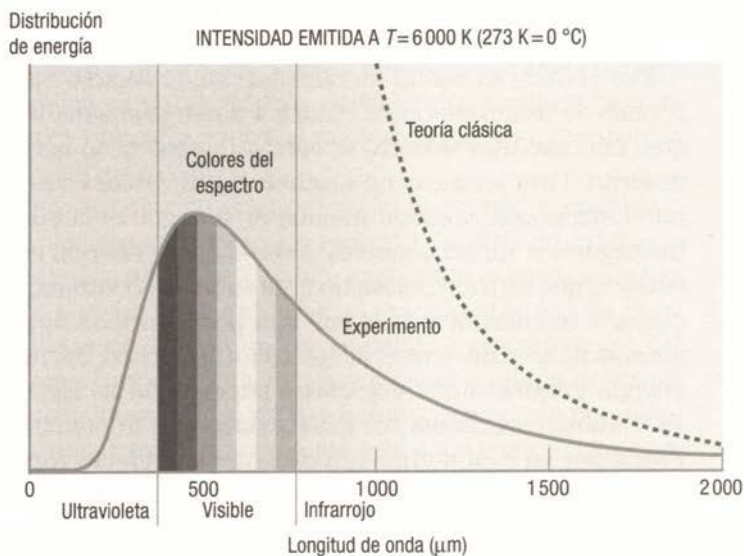
Uno de los postulados básicos de la física clásica era la *ley de equipartición*, que asumía que las ondas emitidas por una fuente de radiación, térmica o de cualquier otro tipo, podían adoptar cualquier valor posible de la energía. Corría el año 1900 cuando el físico alemán Max Planck, en un acto rayano en la desesperación, imaginó la posibilidad de que la energía emitida quizá no adoptaba cualquier valor, sino solo múltiplos de alguna cantidad fundamental, lo que responde a un proceso denominado cuantización que consiste en forzar que una cantidad x adopte valores determinados. Es como si, por ejemplo, el nivel de un vaso de agua solo pudiese ser expresado a través de un número entero de centímetros. Podríamos llenar un vaso con agua hasta una altura de dos centímetros o tres, pero nunca hasta dos y medio.

No había motivo alguno para suponer que las ondas electromagnéticas se comportaban así, pero la suposición de Planck dio excelentes frutos. La cuantización de las ondas ya no predecía catástrofe ultravioleta alguna y explicaba perfectamente la distribución espectral de la energía de un cuerpo radiante. El propio Planck renegó al principio de su idea, más propia de un estudiante tramposo que intenta encajar sus datos con una teoría conveniente; con todo, la cuantización que él introdujo forma parte de la física más sólidamente establecida.

La teoría de cuantización de Planck ganó apoyo tras resolver otra duda que preocupaba a los científicos. Cuando un haz de luz incide sobre un metal, este emite electrones en determinadas condiciones. Se trata del llamado *efecto fotoeléctrico* (figura 2). Según la física clásica, cualquier tipo de radiación electromagnética podría lograr este efecto. Un haz de ondas de radio tardaría más porque su energía es más baja, y la luz ultravioleta, de mayor energía, lo haría en menos tiempo, al igual que una suave llovizna llenará un recipiente de agua tarde o temprano. Pero, al final, los electrones abandonarían el metal con una energía tanto más alta cuanto mayor fuese la intensidad de la radiación incidente.

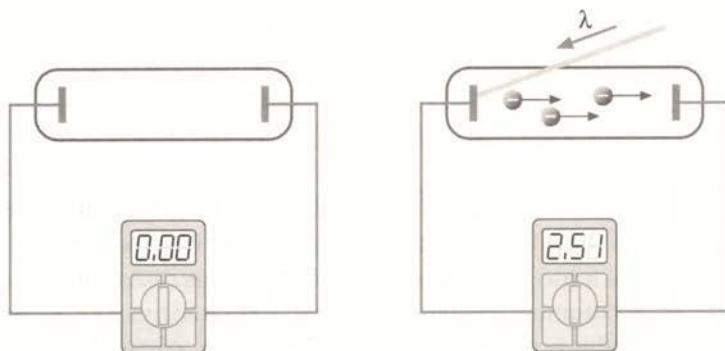
Sin embargo, no fue eso lo que se observó en el laboratorio. Lo que se comprobó fue que la energía de los electrones era la

FIG. 1



Radiación electromagnética emitida por el Sol para las diferentes longitudes de onda. La teoría clásica predice una intensidad infinita a frecuencias muy altas, o lo que es lo mismo, a longitudes de onda cortas, resultado que no coincide con la realidad. Este fenómeno se denominó *catástrofe ultravioleta*.

FIG. 2



La corriente eléctrica no circula entre dos placas metálicas en el vacío (izquierda), pero se activa ante la presencia de radiación electromagnética (derecha) ya que dichas placas emiten electrones cuando la radiación incide sobre ellas.

misma, con independencia de la intensidad incidente. Peor aún, para frecuencias por debajo de la llamada frecuencia de corte, no se emitían electrones.

Fue entonces cuando un oficinista suizo decidió aplicar la hipótesis de cuantización de Planck a dicho problema y descubrió que, con ese movimiento, el efecto fotoeléctrico quedaba bien descrito. Para arrancar un electrón de su órbita es preciso proporcionarle una cantidad mínima de energía. Si la energía electromagnética forma paquetes discretos con energía cuantizada, es decir, que no transportan energía en forma continua, solo la luz con una frecuencia lo bastante alta podrá proporcionar la energía suficiente para activar el efecto fotoeléctrico; los fotones con energía inferior serán absorbidos sin emisión de electrones. En 1922 nuestro oficinista fue galardonado con el premio Nobel de Física por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico. Seguro que su nombre le resulta familiar: Albert Einstein.

El efecto fotoeléctrico muestra asimismo que la luz, una onda electromagnética, puede también ser considerada como una partícula, lo que hoy llamamos fotón. No solo es capaz de arrancar un electrón de la órbita de un átomo, sino que al colisionar se comporta igual que una partícula, tal y como mostró el efecto Compton descubierto en 1923, que evidenció que la longitud de onda de un fotón aumenta tras chocar con un electrón libre, perdiendo parte de su energía. Por otro lado, cuando un haz de electrones interacciona con una estructura cristalina, produce patrones de difracción idénticos a los de un haz de rayos X, lo que demuestra que, en ocasiones, las partículas materiales se comportan como si fuesen ondas.

El carácter dual de la naturaleza fue finalmente establecido por el físico francés Louis de Broglie en un famoso postulado, según el cual tanto las partículas como las ondas disfrutaban de características comunes a ambos: las partículas tienen una onda asociada, y las ondas pueden ser consideradas como partículas. Este resultado, conocido como *dualidad onda-corpúsculo*, nos permite estudiar un cuerpo como onda o como partícula, según nos interese.

Aquella nueva teoría cuántica fue aplicada a diversos sistemas microscópicos con gran éxito, pero de forma formalmente

incompatible con las teorías clásicas vigentes hasta la fecha. Un ejemplo típico lo constituye el modelo atómico de Bohr, donde los electrones giran en sus órbitas alrededor de un núcleo formado por protones y neutrones. El electromagnetismo de Maxwell estipuló que un electrón girando en su órbita perdería energía rápidamente y chocaría contra el núcleo. Según eso, los átomos ni siquiera podrían existir.

Capaz de predecir con gran precisión la energía absorbida o cedida por un átomo cuando un electrón cambia de órbita, la teoría cuántica no podía, en cambio, explicar la existencia de esa órbita. Para sortear los obstáculos, el modelo atómico de Bohr introdujo una serie de postulados: el electrón gira alrededor del núcleo de una forma que la mecánica clásica puede describir pero sin perder energía, y, al mismo tiempo, el electrón no puede trazar una órbita cualquiera, sino que esta debe cumplir una condición de cuantización adicional.

En esa ocasión, el término «postulado» fue un eufemismo que sirvió para inventarse reglas a conveniencia, lo que otorgó a la mecánica cuántica cierto aire de arbitrariedad que permitió mezclar nuevas y viejas reglas, de forma más o menos caprichosa. Asumir que, sin motivo aparente, los electrones acelerados radian energía cuando están libres y que no lo hacen cuando están confinados en sus órbitas atómicas, no parece una explicación demasiado fundamentada.

Por todo ello, urgió reformular toda la mecánica cuántica descubierta hasta entonces y convertirla en una teoría rigurosa y coherente, donde modelos como la cuantización de la energía o el átomo de Bohr encajaran de modo natural, sin tener que introducirlos como mecanismos *ad hoc*. El proceso llevó al desarrollo de la mecánica cuántica tal y como la conocemos hoy.

OBJETIVO: FORMALIZAR LA MECÁNICA CUÁNTICA

Convertir los retazos hasta entonces descubiertos en una teoría bien fundada y con reglas claras fue un proceso en el que participaron muchos nombres, entre ellos algunos de los más ilustres

LOS ELECTRONES EN EL ÁTOMO DE BOHR

Un bloque de hierro, al calentarse hasta el rojo blanco (fase posterior al rojo vivo), emite radiación en todo tipo de frecuencias. En cambio, la emisión de energía en forma de luz (o, en general, de radiación electromagnética) de un gas como el hidrógeno a alta temperatura, se da solo a frecuencias muy determinadas. Las líneas de ese tipo de emisión parecían agruparse en series, de acuerdo a una ley descubierta en el laboratorio. En 1888, el físico sueco Johannes Rydberg postuló la fórmula que lleva su nombre, que nos indica las longitudes de onda λ de la radiación emitida, en función de dos números naturales, n y m ($m < n$), y de una constante R llamada, por supuesto, constante de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Esta limitación impuesta era imposible según las teorías clásicas, pero el nuevo modelo del átomo de Bohr, basado en el átomo de hidrógeno, permitía explicarlas: los electrones giran alrededor del átomo en órbitas circulares de radio determinado y, cuando uno de ellos se carga energéticamente, salta a una órbita de mayor radio y energía. Al volver a su órbita original, el electrón emite energía en forma de fotón. En el átomo de Bohr el radio de las órbitas está cuantizado, y solamente están permitidas aquellas cuyo radio sea múltiplo del cuadrado de un número entero:

$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m_e} n^2$$

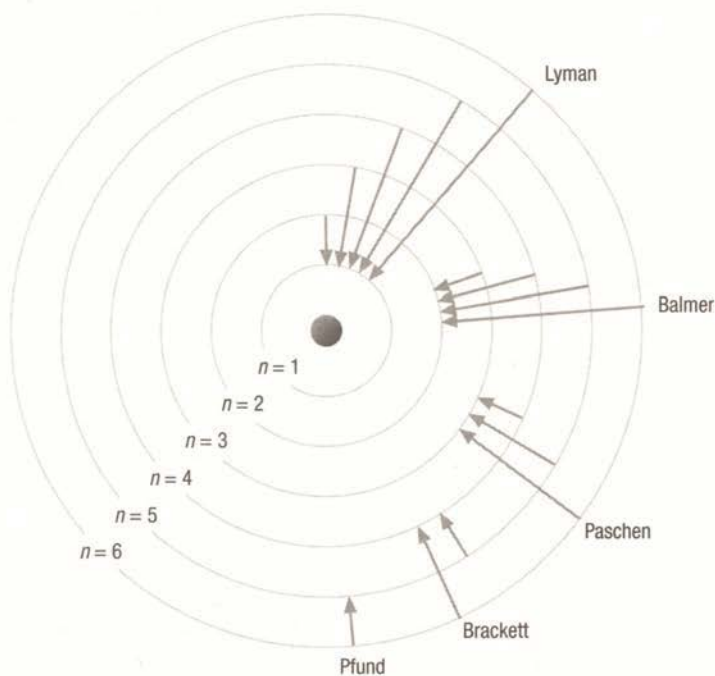
donde aparecen algunas de las constantes fundamentales del universo: la constante de Planck h , la constante dieléctrica del vacío ϵ_0 , la carga del electrón e y su masa m_e . La energía de los electrones en el átomo de Bohr está asimismo cuantizada:

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{8 h^2 \epsilon_0^2 n^2}$$

De esa forma, el paso del electrón desde una órbita n a otra de energía inferior m implica una variación de energía también cuantizada; utilizando las dos relaciones anteriores, y teniendo en cuenta que la variación de energía se emite en forma de fotón con una energía $\Delta E = hc/\lambda$, obtenemos finalmente la fórmula de Rydberg en la que c es la velocidad de la luz:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Al asignar valores enteros a los números n y m obtendremos las longitudes de onda permitidas para la radiación emitida por el átomo. Cada valor de n da lugar a lo que se denomina una *serie*. Cuando $n = 1$ obtenemos la llamada *serie de Lyman* (descubierta entre 1906 y 1914) con líneas espectrales ultravioleta. Para $n = 2$ tenemos la *serie de Balmer*, conocida con anterioridad ya que emitía energía en la parte visible y también ultravioleta, adyacente al espectro visible. Otras series son las de Paschen ($n = 3$), Brackett ($n = 4$) y Pfund ($n = 5$), todas ellas en el espectro infrarrojo. En años posteriores se comprobó que el átomo de Bohr era incompleto, pues las longitudes de onda de las líneas espectrales y la constante de Rydberg variaban levemente con respecto a los datos experimentales. Correcciones posteriores fueron mejorando el modelo, que aún sigue siendo útil por su sencillez y su precisión.



(Los radios de las órbitas no están a escala)

Series espectrales para el átomo de Bohr.

científicos del siglo xx. Dirac, Heisenberg o el propio Einstein realizaron contribuciones notables a la causa, por lo que resultaría injusto atribuir la paternidad de la mecánica cuántica solo a uno de ellos. Sin embargo, nos centraremos en la figura del que logró proporcionar una imagen clara y bastante intuitiva del asunto, lo que, tratándose de cuántica, ya es decir mucho.

Se trata del físico austríaco Erwin Schrödinger quien, como muchos otros, intentó fundar una teoría cuántica que pudiese describir los fenómenos observables en base a una auténtica «mecánica» que debía ser capaz de explicar tanto el movimiento de los cuerpos como sus causas subyacentes. Para conseguirlo, se basó en los resultados obtenidos hasta entonces (la cuantización, la conservación de la energía y del momento angular, y la dualidad onda-corpúsculo) y se propuso determinar cuál sería el análogo a la famosa $F=ma$ de Newton en el nuevo mundo cuántico.

El desarrollo mecanocuántico de Schrödinger postuló la existencia de una función matemática capaz de contener toda la información accesible sobre el sistema estudiado. A dicha función se la conoce con el nombre de *función de onda*.

Para determinar la función de onda se asume que esta cumple una ecuación diferencial que hoy conocemos con el nombre de *ecuación de Schrödinger*. Se trata de una ecuación muy difícil de resolver, incluso para casos sencillos, puesto que incorpora derivadas temporales y espaciales. La ecuación de Schrödinger permite explicar la cuantización de la energía en el ámbito atómico sin necesidad de incluir los postulados artificiales necesarios en el modelo de Bohr y, gracias a ella, otros investigadores consiguieron extender todavía más los límites de la nueva física.

A pesar de su utilidad, la función de onda genera una estela de consecuencias inesperadas y sorprendentes. Hasta ese momento, las ecuaciones de la física permitían obtener cualquier cantidad que deseásemos calcular con un grado de precisión sin límites. La única barrera para saber exactamente a qué velocidad viaja una partícula o cuál es su energía o posición, era la misma pericia del experimentador.

En mecánica cuántica, por el contrario, eso no es posible. Para fijar la posición de una partícula, por ejemplo, podemos

iluminarla lanzándole un fotón; pero cuando el fotón choque con la partícula, la velocidad de esta cambiará. Podemos iluminar más fuertemente la partícula para determinar mejor su emplazamiento, pero el resultado será cambiar aún más el valor de la velocidad. Ese efecto, conocido

como principio de indeterminación de Heisenberg, nos impone límites a la precisión con que podemos medir parejas de cantidades (en ese caso, posición y velocidad). No se debe a nuestra impericia como experimentadores, sino que se trata de una limitación a nivel básico. Simplemente, no podemos calibrar todo tipo de variables con precisión absoluta.

Esto nos lleva al mundo de las probabilidades. La limitación que nos impone el principio de indeterminación nos fuerza a sustituir la certeza por la probabilidad. No podemos saber dónde está la partícula, pero sí dónde es más probable que esté.

A pesar del éxito de la mecánica cuántica a la hora de describir y predecir sucesos, sus propios fundadores estaban inquietos en lo que respecta a la interpretación de dichos resultados. Si lo único que se puede medir son las probabilidades, si el principio de indeterminación nos impone restricciones acerca de lo que podemos medir, si la dualidad onda-corpúsculo nos permite observar un sistema como onda o como partícula, pero no como ambas cosas a la vez... ¿en qué queda la objetividad de la física? ¿Cómo podemos estar seguros de nada en un mundo tan nebuloso?

Algunos autores, como Bohr y Heisenberg, afirmaron que la función de onda representa todo lo que podemos saber del sistema y que lo que no podamos extraer de ella es como si no existiera. No tiene sentido preguntarse dónde está la partícula antes de medir su posición. El propio concepto de posición deja de tener sentido, puesto que la partícula tiene una probabilidad real de encontrarse en cualquier lugar. Solo cuando se la mide, la función de onda «colapsa» y toma un valor concreto. En cierto modo, la partícula «escoge» su posición cuando la observamos, y no antes.

La cuestión... no es tanto ver lo que nadie ha visto todavía, sino pensar lo que aún nadie ha pensado acerca de lo que todo el mundo ve.

ERWIN SCHRÖDINGER

Este peculiar aspecto de la mecánica cuántica, que permite que una partícula pueda estar en cualquier parte hasta que la observemos, suele ilustrarse con el gato de Schrödinger. En el célebre experimento imaginario, este famoso felino se encuentra en una caja cerrada junto a una partícula radiactiva y un frasco de veneno. Si la partícula se desintegra, un martillo caerá sobre el frasco causando la muerte del gato; si no lo hace, este sobrevivirá (figura 3). Cuando se realiza una observación, la función de onda que representa el sistema toma un valor, y solo entonces veremos si el gato está vivo o muerto, pero hasta entonces la pregunta «¿está vivo el gato?» carece de sentido. Es como lanzar una moneda al aire: mientras gira, no tiene sentido preguntarse si saldrá cara o cruz.

Einstein, poco amigo de las fantasías, era reacio a admitir un mundo en el que la realidad física es incierta y depende del observador. Como explicación alternativa, apoyó una formulación mecanocuántica llamada *teoría de variables ocultas*, según la cual el mundo cuántico es perfectamente determinista. Es decir: cada causa tiene siempre el mismo efecto. Es posible que sea físicamente imposible acceder a la información de esas variables ocultas pero, si pudiésemos conocerlas, sería posible volver a un mundo similar al newtoniano, donde todo es certeza y exactitud.

El físico norteamericano Hugh Everett propuso una interpretación alternativa llamada *interpretación de universos múltiples*. Según su visión, cuando miramos dentro de la caja para ver el estado del gato de Schrödinger, nuestro universo se desdobra en otros dos universos; en uno de ellos el gato está vivo, en el otro está muerto. De algún modo, cada vez que hacemos una observación nuestro universo se desdobra en tantos universos paralelos como resultados posibles deriven de ella.

Ni que decir tiene que la interpretación de Everett es un filón para los amantes de la ciencia ficción, pero es tan solo una entre muchas. La naturaleza y significado de la mecánica cuántica sigue bajo discusión filosófica y científica. Filosófica porque siempre deseamos saber qué significan las cosas, y física, porque una interpretación alternativa podría abrir el camino hacia la unificación de la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad y desembocar en la anhelada teoría del todo.

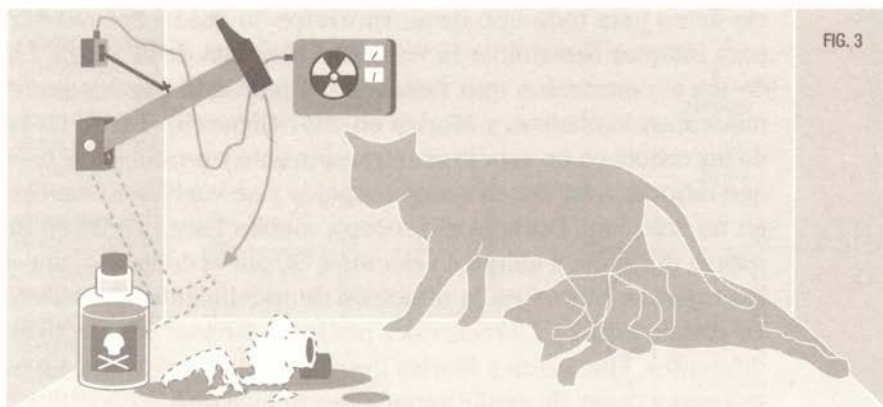


FIG. 3

Una partícula radiactiva puede desintegrarse o no. Si lo hace, el martillo cae sobre el frasco de veneno y el gato muere; en caso contrario, el gato vive. Según la mecánica cuántica, no podemos saber cuál será el caso hasta que no se realice una observación, en ausencia de esta, el gato está en una superposición de estados: vivo y muerto.

DISIPANDO ESOS «PEQUEÑOS NUBARRONES»

Acabamos de ver cómo una de las dos «pequeñas nubes oscuras» de lord Kelvin, su «catástrofe ultravioleta», abrió el camino a la mecánica cuántica. La otra pequeña nube era el experimento de Michelson-Morley sobre el éter, el cual desembocó a su vez en una segunda gran teoría de la física moderna del siglo xx: la relatividad.

A finales del siglo xix se creía que las ondas electromagnéticas debían tener un soporte material cuya vibración permitiera su propagación, al igual que el sonido se propaga por el aire. Nadie sabía de qué estaba compuesta esta sustancia, a la que bautizaron con el nombre de éter, que hacía las veces de soporte. De lo que no había duda es que sus propiedades debían ser muy peculiares: la elevada velocidad de la luz y el hecho de que no se percibiese rozamiento con los planetas en sus órbitas sugería que se trataba de un elemento al mismo tiempo rígido y muy tenue. Y, además, omnipresente, puesto que transmitía la luz de las estrellas que vemos en la bóveda celeste en todas direcciones.

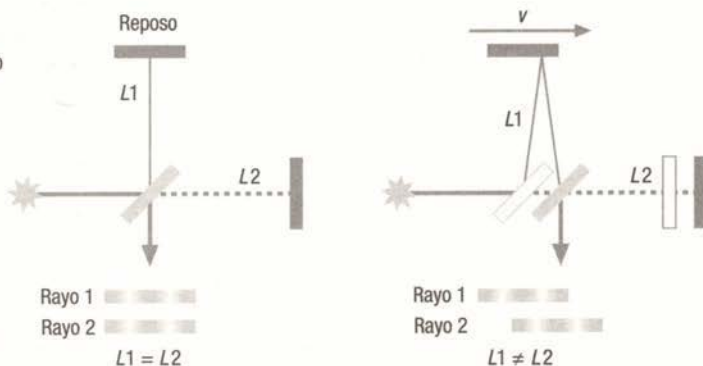
De existir, el éter habría proporcionado un sistema de referencia único para todo tipo de movimientos, lo que se aprovecharía para intentar determinar la velocidad absoluta de la Tierra. Uno de los experimentos más famosos fue realizado por los norteamericanos Michelson y Morley en 1887 (figura 4). En él, un haz de luz rebota en un espejo semitransparente y produce dos haces que rebotan a su vez en sendos espejos y se vuelven a combinar en un solo haz. Durante el proceso, ambos haces recorren una misma distancia a idéntica velocidad. Si, por el contrario, uno de los rayos se mueve en la dirección de movimiento de la Tierra, las distancias L_1 y L_2 recorridas por los dos haces acaban siendo diferentes. Michelson y Morley usaron un interferómetro, un instrumento capaz de medir variaciones minúsculas en la distancia recorrida por un haz de luz. Se esperaba que, alternando la dirección de viaje de los rayos, se conseguiría determinar la velocidad y dirección de movimiento del interferómetro (y, por tanto, de la Tierra) con relación al éter. Sus resultados, publicados en 1887 en la revista *American Journal of Science*, arrojaron un resultado sorprendente: la Tierra no se mueve.

¡Y sin embargo se mueve! como dijo Galileo. En concreto, gira en torno al Sol a una velocidad de 30 kilómetros por segundo, y su traslación alrededor de la Vía Láctea es aún más veloz. Habida cuenta de la precisión alcanzada por el experimento de Michelson-Morley, tan solo cabían dos explicaciones: o bien el éter se las arregla para seguir a la Tierra en su movimiento por el universo, y por tanto el movimiento relativo entre ambos es nulo o, sencillamente, el éter no existe.

Implícitamente se ha supuesto que las velocidades de la luz (V) y de la Tierra (v) pueden sumarse de forma sencilla. Cuando el rayo viaja en el sentido del movimiento de la Tierra, la velocidad relativa entre la luz y el espejo contra el que va a rebotar será $V-v$; después del rebote, su velocidad relativa respecto a este será $V+v$. Los resultados del experimento sugerían que v , la velocidad respecto al éter, era igual a cero.

Hoy sabemos que el espacio entre cuerpos celestes está prácticamente vacío. El concepto de *campo electromagnético* explica la transmisión de ondas por el espacio sin necesidad de

Dos rayos de luz recorren distancias iguales en un interferómetro en reposo (izquierda), pero si este se encuentra en movimiento los trayectos de ambos rayos serán diferentes (derecha). Los resultados de Michelson y Morley parecían decir que la Tierra no se movía. La explicación a esta paradoja la resolvió la relatividad.



soporte material alguno. Pero, con éter o sin éter, el caso es que la Tierra se mueve. ¿Por qué ese movimiento no apareció en el experimento de Michelson-Morley? No tenía sentido alguno. No es de extrañar que Michelson, durante el resto de su vida, creyese que su experimento había sido un fracaso.

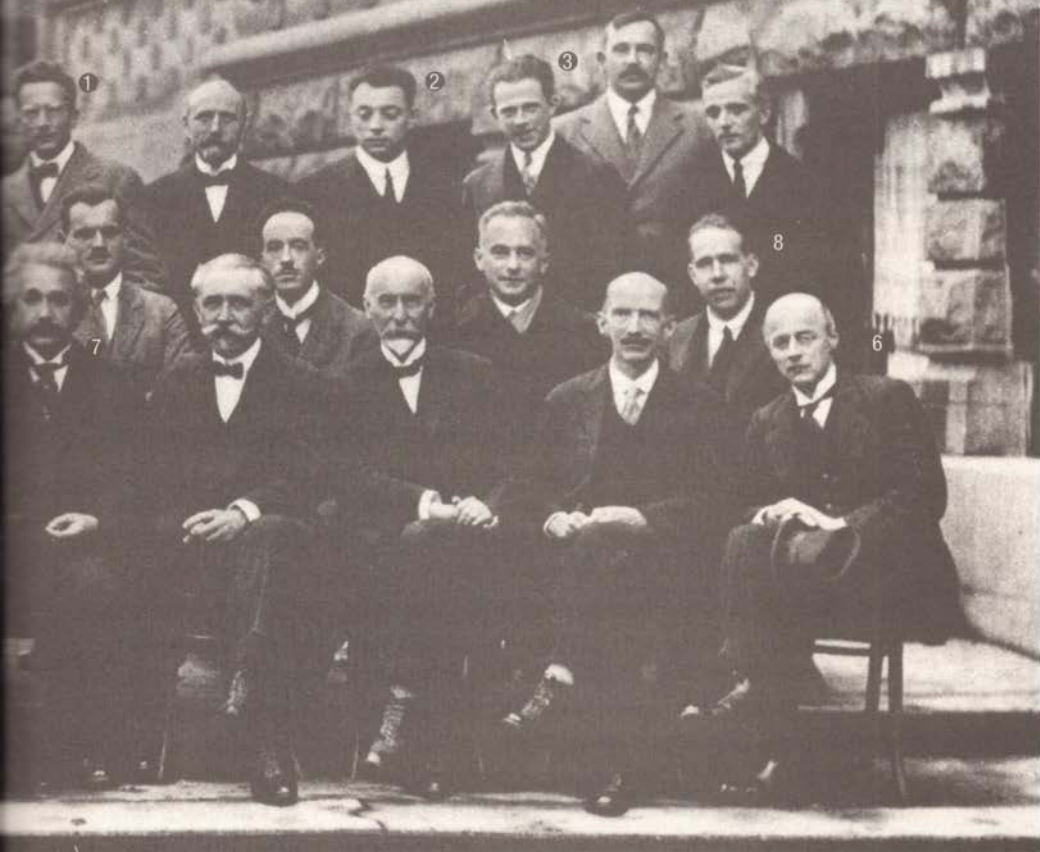
Era el momento de las soluciones descabelladas. Una de ellas fue propuesta en 1892 por el físico holandés Hendrik Lorentz, y consistió nada menos que en una reescritura de los conceptos de tiempo y espacio. La mecánica clásica nos permite relacionar las velocidades que miden dos observadores en sistemas de referencias distintos mediante una relación sencilla conocida como transformación de Galileo. En ella, las velocidades pueden sumarse linealmente, de forma que:

Velocidad del cuerpo respecto a A
 = velocidad del cuerpo respecto a B
 + velocidad de B respecto a A

Ahora bien, pensó Lorentz, imaginemos una transformación diferente, una que permita combinar velocidades de tal forma que la velocidad de la luz sea siempre la misma. ¿Es posible ob-



Entre los participantes que se encuentran en esta conocida imagen de la 5ª conferencia Solvay, celebrada en Bruselas en 1927, están los grandes científicos que sentaron las bases de la relatividad y la física cuántica: Schrödinger (1), Pauli (2), Heisenberg (3), Dirac (4), Planck (5), Richardson (6) y, por supuesto, Einstein (7) y Bohr (8), quienes durante años mantuvieron largas discusiones sobre la posibilidad de aunar los dos grandes ámbitos de la física teórica contemporánea.



tener una transformación así? Matemáticamente lo es. A partir de este punto, adoptaremos la convención habitual de llamar c a la velocidad de la luz en el vacío, y teniendo dos sistemas de referencia A y B , supondremos que el sistema de referencia B se mueve a lo largo del eje X con una velocidad v respecto al sistema A . Lorentz halló una relación entre las coordenadas de ambos sistemas de referencias, de tal forma que la velocidad c se mantiene constante. A esa relación se la conoce como transformación de Lorentz.

No parece que el propio Lorentz fuese consciente de las consecuencias finales de su transformación, pues se limitó a proponerla a mero efecto de cálculo. Otros físicos y matemáticos de la época, como FitzGerald, Poincaré o Larmor, jugaron con ideas similares, pero ninguno tuvo la ambición suficiente para convertirlas en una teoría nueva y revolucionaria.

Ese honor estaba reservado para Albert Einstein. Su revolucionaria teoría de la relatividad (llamada «especial» más adelante, cuando se desarrolló la relatividad general) parte de dos sencillos postulados:

1. Las leyes de la física son iguales para todos los observadores inerciales (no acelerados).
2. La velocidad de la luz en el vacío es siempre la misma, con independencia de la velocidad de la fuente de luz con respecto al observador.

El primer postulado es una extensión del llamado principio de relatividad de Galileo, según el cual las leyes de la mecánica son las mismas en todos los sistemas inerciales. En 1905, Einstein extendió la relatividad de Galileo al campo de la electrodinámica, elevando el concepto a la categoría de principio fundamental, y consiguió deducir las transformaciones de Lorentz que garantizan la validez de las ecuaciones de Maxwell.

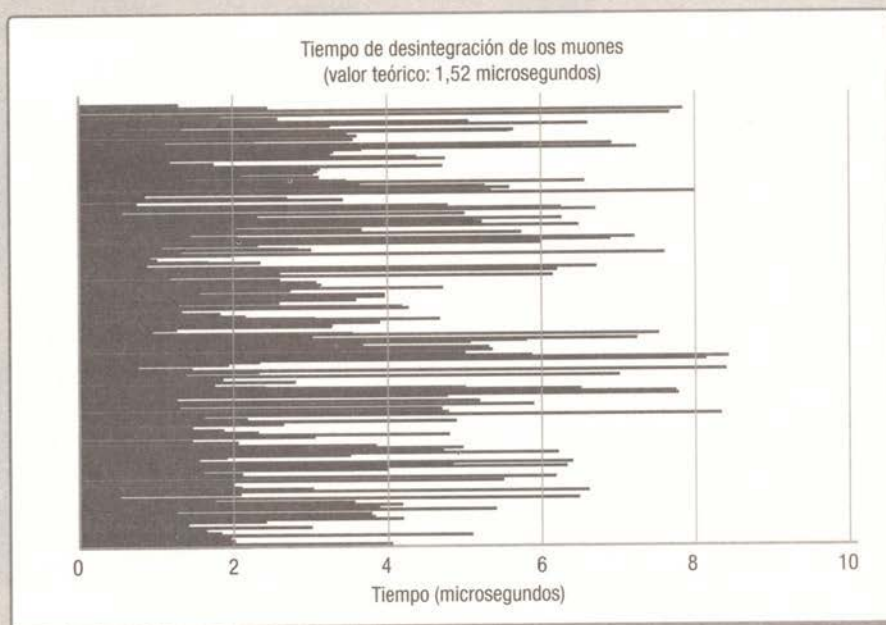
Pero el precio que había que pagar era elevado. La relación entre el tiempo t medido por un observador fijo y el tiempo t' que registra un observador móvil depende de la velocidad de este últi-

LOS MUONES, CAPACES DE ALCANZAR LA TIERRA

Para comprobar la dilatación del tiempo debida a la teoría de la relatividad especial se necesitan objetos que se muevan a gran velocidad y que incorporen un reloj interno de gran precisión. Como los muones, esas partículas con una vida media de unas dos millonésimas de segundo que se crean cuando los rayos cósmicos de alta energía procedentes del universo impactan en la atmósfera superior, a diez kilómetros de la superficie. Un muon tiene un 50% de probabilidad de desintegrarse tras 1,52 microsegundos, así que, teóricamente, incluso a velocidades próximas a las de la luz, un muon recorrería algo menos de medio kilómetro. Estadísticamente, solo uno de cada tres millones de muones podría llegar a la superficie de nuestro planeta.

Los experimentos que alargaron la vida al muon

En 1963, David Frisch y James Smith midieron el flujo de muones a nivel del mar y en la cima del Monte Washington (EE UU), a una altura de 1910 m. Las cantidades medidas, incompatibles con el conocimiento sobre la vida media de los muones, eran correctas en un mundo relativista. Esos muones tenían una velocidad inicial superior al 99% de la velocidad de la luz. Como no todas las partículas tenían la misma velocidad, se esperaba una dilatación temporal teórica de entre 6,4 y 10,4. Y efectivamente, esta fue de 8,8. Así pues, los muones «vivían» casi nueve veces más de lo estimado, dándoles tiempo de atravesar la atmósfera e impactar contra el suelo.



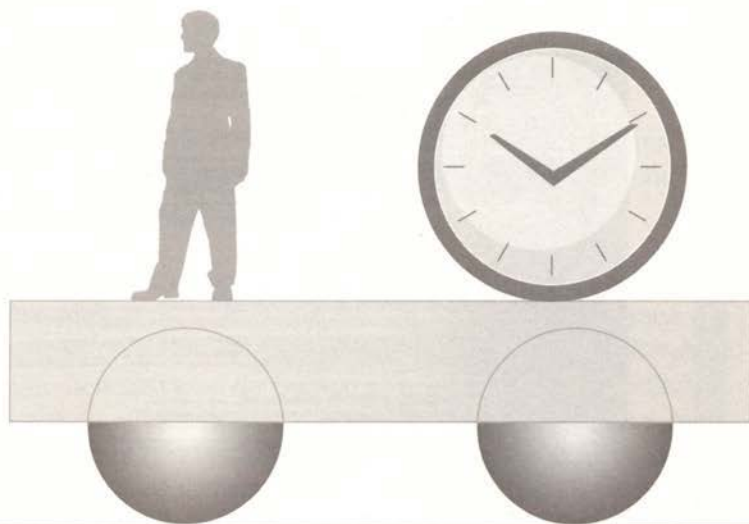
mo. El resultado es algo que contradice nuestra experiencia cotidiana: el tiempo ya no es una cantidad absoluta, sino que depende de la velocidad a la que viajamos. Un mismo suceso que tarde un segundo medido desde un sistema de referencia móvil, parecerá que tarda algo más que si se mide desde un sistema fijo.

A las velocidades habituales a las que se mueve el ser humano, ese efecto es minúsculo: el reloj de un viajero que se desplazase a 300 km/h en un trayecto de una hora de duración se retrasaría una diezmilmillonésima de segundo. El efecto de retraso de los relojes en movimiento solo resulta apreciable a altas velocidades.

Pero la dilatación temporal también significa contracción espacial. Imaginemos un rayo de luz que viaja horizontalmente. De nuevo, los observadores fijo y móvil miden la misma velocidad de la luz. Pero recordemos que la velocidad es igual a la distancia dividida por el tiempo. Ambos observadores miden tiempos dis-

FIG. 5

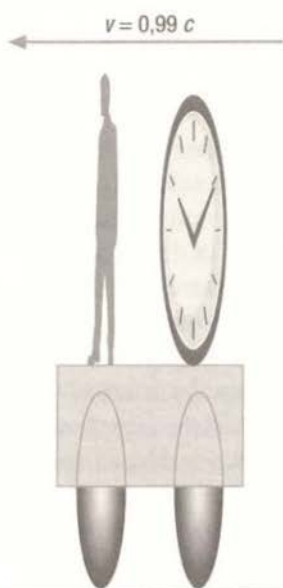
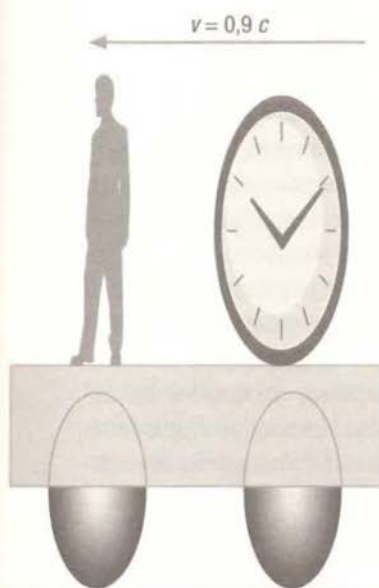
Reposo



tintos (figura 5), de modo que la única posibilidad de mantener un valor de c constante es que también midan una longitud diferente. El observador fijo notará que un objeto con una longitud L en reposo se contraerá cuando viaje a una velocidad v .

Visto desde la estación, el vagón de tren se hace más corto y un reloj en su interior se atrasará. Pero dentro del propio vagón las cosas parecen normales: el observador móvil no nota ningún cambio en las dimensiones de los objetos que hay en el interior del vagón, y todo lo que indique cambios en el tiempo, desde el reloj hasta sus propios latidos, seguirá sin cambios aparentes. Solamente cuando los dos observadores se junten y comparen sus relojes comprobarán que algo ha variado.

Todas estas rarezas del tiempo y el espacio no fueron descubiertas solamente por Einstein. La contracción de FitzGerald (o de FitzGerald-Lorentz) para la longitud fue planteada en 1889,



Efecto relativista: el observador en reposo notará cómo el vagón que se mueve a una velocidad relativista v será más corto (contracción espacial) y el reloj de su pasajero avanzará más lentamente (dilatación temporal). A medida que la velocidad del vagón aumenta y, por tanto, se acerca a la de la luz, el efecto relativista de la contracción de la longitud de un cuerpo en movimiento (con velocidad relativista) es proporcional a la raíz de

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

la dilatación temporal fue conjeturada por Joseph Larmor en 1897 y en 1903 el matemático francés Henri Poincaré postuló que no cabía pensar en espacio y tiempo como conceptos absolutos. Incluso la famosa relación entre masa y energía $E=mc^2$ había sido sugerida con anterioridad a 1905.

Sin embargo, Einstein hizo mucho más que redescubrir la transformación de Lorentz. En lugar de limitarse a aceptar esas rarezas o proponer transformaciones para ajustar leyes particulares, postuló la equivalencia de las leyes de la física para todos los observadores inerciales junto con la constancia de la velocidad de la luz en el vacío; a partir de ahí, construyó su teoría. De esta manera, tanto las transformaciones de Lorentz como la dilatación del tiempo o la transformación del concepto de simultaneidad, todo pudo explicarse a partir de sus dos sencillos principios.

LA RELATIVIDAD GENERAL Y EL TEJIDO DEL ESPACIO-TIEMPO

Fue entonces cuando el propio concepto de tiempo y espacio como entidades separadas se desvaneció. En su lugar, apareció un *espacio-tiempo* de cuatro dimensiones (x, y, z, t) como entidad única e inseparable. Desde entonces, un punto en el espacio tridimensional ha dejado de tener realidad física por separado, pero combinado con un instante de tiempo describe un *suceso* tetradimensional; la distancia entre dos puntos se sustituye por el concepto de *intervalo* y la clásica trayectoria deja paso a una *línea de universo* que describe el conjunto de sucesos que ocupa una partícula a lo largo de toda su historia pasada, presente y futura.

La teoría de la relatividad especial permite acomodar las leyes del electromagnetismo en un universo donde las reglas son iguales para todos; ningún observador tendrá una posición o un tiempo privilegiados. Aun así, la nueva física continuó estando limitada a los observadores en sistemas inerciales, es decir, a aquellos que cumplen la primera ley de Newton:

En ausencia de fuerzas externas, un cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme.

Existen, no obstante, sistemas de referencia en estado de aceleración (o deceleración) que no cumplen dicha regla. El ejemplo clásico es el de un avión que está acelerando en la pista de despegue. Incluso con las ventanillas cerradas el viajero podrá notar, a partir de la aceleración, que ha cambiado su estado de movimiento. Ese hecho parece dotar al movimiento de un carácter absoluto cuando es medido en sistemas de referencia acelerados (también llamados «no inerciales»), frente al carácter relativo en sistemas sometidos a una velocidad uniforme (llamados «inerciales»).

A Einstein no le gustaba esa dicotomía, y prefería imaginar un universo donde todos los observadores, inerciales o no, experimentasen las mismas leyes físicas. Con tal fin dedicó sus siguientes esfuerzos a extender su teoría de la relatividad desde el caso «especial» de los sistemas inerciales al caso «general» de toda clase de sistemas. La clave, que él mismo describió como la idea más feliz de su vida, fue el descubrimiento del llamado *principio de equivalencia*, que puede enunciarse así:

En cualquier región pequeña del espacio, los efectos producidos por la gravitación son los mismos que los producidos por una aceleración.

Para entenderlo, imagine que se encuentra en una nave espacial. No hay planetas ni otros cuerpos que creen un campo gravitatorio, lo que le deja flotando en situación de ingravidez. Ahora se encienden los motores del cohete, y siente una aceleración no inercial. Le parecerá que algo tira de usted en sentido opuesto al del movimiento del cohete, pero no se trata de una fuerza verdadera, sino de una fuerza ficticia producida por la aceleración. A todos los efectos, sentirá lo mismo que si se encontrase en la Tierra antes del despegue, donde lo que tira de usted no es sino la fuerza de la gravedad.

La expresión «a todos los efectos» es importante puesto que encierra la clave para entender la teoría de la relatividad general.

El espacio le dice a la materia cómo moverse, y la materia le dice al espacio cómo curvarse.

JOHN WHEELER, ASTROFÍSICO ESTADOUNIDENSE

CÓMO EL GRAVITY PROBE B COMPROBÓ LA DISTORSIÓN DEL ESPACIO-TIEMPO

SONDEANDO LA RELATIVIDAD

Lanzado por la NASA en abril de 2004, el satélite Gravity Probe B tenía como misión probar algunos aspectos de la relatividad general de Einstein con una precisión sin precedentes.

Efecto de la rotación
Efecto de la masa

ESFERAS PERFECTAS

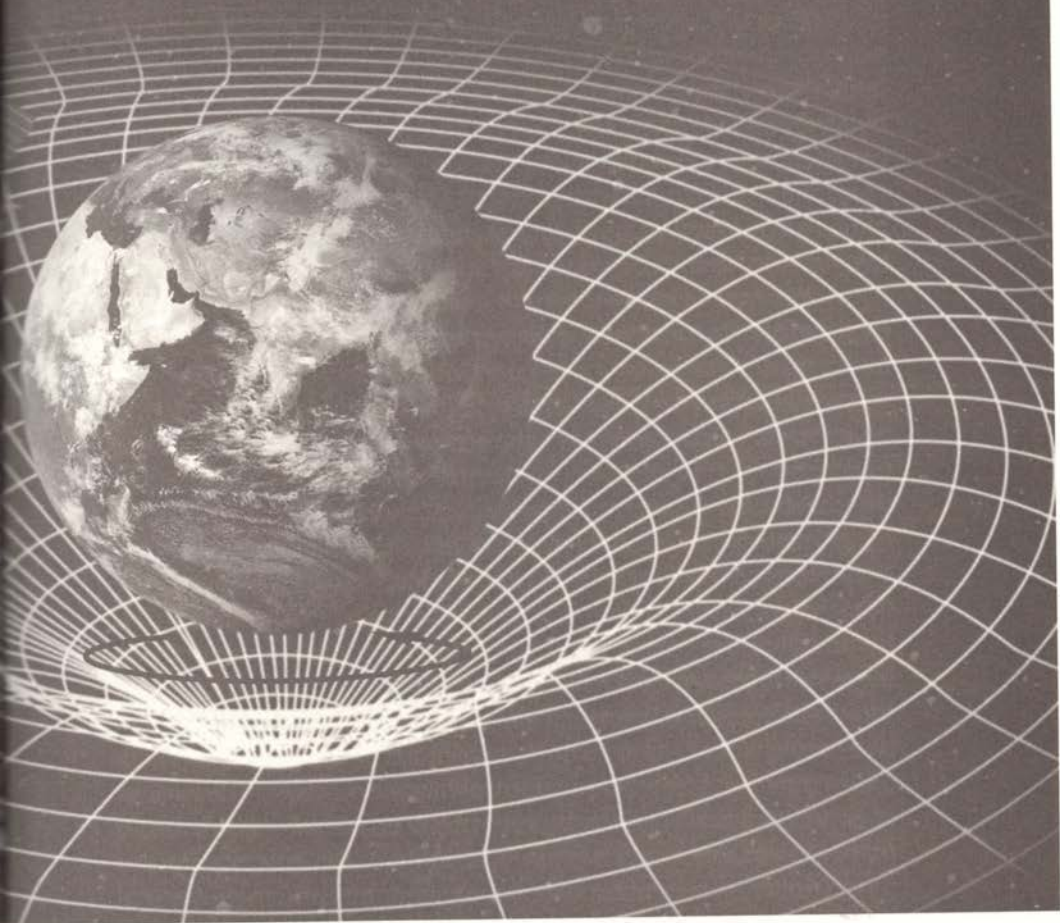
El satélite Gravity Probe B llevaba cuatro giroscopios esféricos perfectos para verificar la existencia de la curvatura del espacio-tiempo. En ausencia de dicha curvatura, es decir, en una interpretación newtoniana clásica, los giroscopios deberían girar de manera alineada respecto al punto de referencia, en este caso la estrella IM Pegasi. Sin embargo, los cambios en la dirección del giro demostraron el efecto de la masa y de la rotación de la Tierra en la distorsión del espacio-tiempo.

EINSTEIN TENÍA RAZÓN

Los datos del satélite confirmaron la existencia del efecto de arrastre del espacio-tiempo. Otro aspecto más de la teoría de la relatividad general de Einstein fue demostrado empíricamente.

ARRASTRE DEL ESPACIO-TIEMPO

Una masa en rotación, como la Tierra, arrastra el espacio-tiempo como un nadador arrastra el agua a su alrededor. El propio Einstein creía que este efecto es demasiado pequeño para ser medido, pero el Gravity Probe B consiguió determinarlo con gran precisión un siglo después.

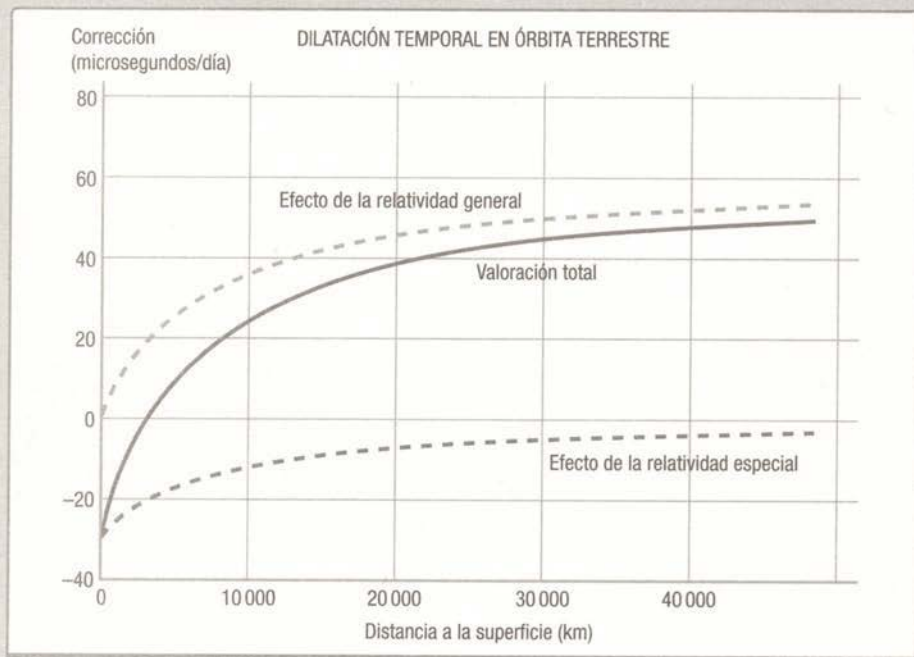


LOS NAVEGADORES Y EL GPS, FRUTO DE LA RELATIVIDAD

El sistema de posicionamiento global GPS funciona gracias a una red de satélites que envían señales codificadas desde 20 200 kilómetros de altura. Cuando el receptor capta esas señales, determina su tiempo de llegada, y al multiplicar esa cantidad por la velocidad de la luz, se obtiene una distancia relativa que permite fijar la posición del receptor. Los satélites GPS incorporan un reloj atómico de alta precisión. Su estabilidad en la medición del tiempo es del orden de una parte entre un billón, lo que significa que adelanta o atrasa, como mucho, un segundo cada 32 000 años. Una precisión tan elevada puede parecer caprichosa pero no lo es en absoluto, ya que debe corregir los errores debidos a las teorías relativistas de Einstein, tanto la especial como la general.

La curvatura del espacio-tiempo y la precisión de los satélites

Un satélite en órbita se mueve a mayor velocidad que un punto sobre la superficie terrestre y, según la relatividad especial, dos relojes marcarán tiempos distintos al moverse a velocidades distintas. También actúan los efectos de relatividad general, puesto que el campo gravitatorio terrestre es más débil en las cercanías del satélite que en la superficie, y por tanto el espacio-tiempo se curva en distinto grado. Ambas correcciones relativistas muestran signos opuestos: la mayor velocidad del satélite ralentiza su propio tiempo, y su lejanía del campo gra-



vitatorio terrestre lo acelera en relación a nosotros. ¿Qué efecto prevalece? Para velocidades sensiblemente inferiores a la de la luz, las dilataciones temporales adoptan formas sencillas:

$$\Delta(RE) \simeq -\frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

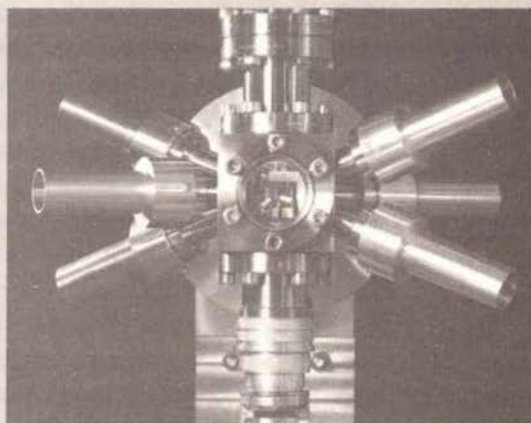
$$\Delta(RG) \simeq \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_{GPS}} \right)$$

donde $v = \sqrt{2GM/R_{GPS}}$ es la velocidad del satélite en una órbita circular de radio R_{GPS} , c es la velocidad de la luz en el vacío, R_T es el radio de la Tierra, M su masa y G es la constante de gravitación universal.

Sustituyendo los parámetros orbitales del satélite GPS, resulta que

$$\begin{aligned}\Delta(RE) &= -8,4 \cdot 10^{-11} = -7,3 \text{ microsegundos/día.} \\ \Delta(RG) &= +5,3 \cdot 10^{-10} = +45,7 \text{ microsegundos/día.} \\ \Delta(\text{total}) &= +4,5 \cdot 10^{-10} = +38,4 \text{ microsegundos/día.}\end{aligned}$$

El reloj del satélite GPS, por tanto, adelanta con respecto al nuestro. La diferencia es pequeña, aproximadamente un segundo cada setenta años, pero el elevado valor de la velocidad de la luz conlleva un error asociado en la posición de algo más de diez kilómetros diarios. Los relojes atómicos de los satélites GPS corrigen este desfase variando levemente su frecuencia de oscilación. El valor y el signo de la corrección relativista varía según la distancia. Para una órbita de 3200 kilómetros de altitud sobre la superficie terrestre, los efectos de dilatación temporal debidos a la relatividad especial y a la general se compensan. Por debajo de dicha altitud, el reloj del satélite atrasa respecto al de la superficie y, a mayor altitud, adelanta. La órbita de los satélites GPS (situada a 20200 kilómetros de altura) se diseñó con diversos propósitos en mente, pero la anulación de las correcciones debidas a la relatividad espacial y la relatividad general no fue una de ellas. La próxima vez que se pregunte para qué necesitamos un reloj atómico que no atrase ni un segundo en miles de años, ya conoce una respuesta: para saber exactamente dónde estamos.



Reloj atómico del Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido.

En un sistema de referencia inercial, la aceleración se relaciona con la fuerza mediante la conocida expresión $F=ma$, donde m es la masa inercial, una cantidad que representa la inercia o, en términos poco técnicos, la «pereza» de un cuerpo. Por otro lado, la intensidad de la fuerza de la gravedad está condicionada por una magnitud denominada «masa gravitatoria». No hay motivo para que ambas masas sean del mismo tipo, ni para que sean proporcionales entre sí.

Al soltar un cuerpo, la aceleración que sufre es proporcional al cociente entre masa gravitatoria y masa inercial. Si dicho cociente fuese siempre el mismo, objetos con la misma masa inercial caerían con idéntica aceleración. ¿Lo hacen? La respuesta, verificada en multitud de experimentos, es un rotundo sí. Einstein aceptó la equivalencia «masa inercial = masa gravitatoria» y la elevó a la categoría de principio fundamental, permitiéndole así hacer un tratamiento en el cual la gravedad actúa como una fuerza con efectos indistinguibles a los de una aceleración.

Nos encontramos, eso sí, con el problema de que esa equivalencia ha de ser local (de ahí la condición «en cualquier región pequeña del espacio»). Dos observadores, uno cayendo hacia el suelo desde el polo Norte y otro desde el ecuador, pueden considerarse a sí mismos como observadores inerciales mientras caen, pero no existe ningún sistema inercial que los contenga a ambos.

La solución adoptada por Einstein para trabajar con el espacio-tiempo a nivel global fue suponer que está compuesto por múltiples trocitos de espacio-tiempo plano «pegados» entre sí, de manera que la suma ya no es plana sino curva. Sería algo así como un balón de fútbol, que tiene una forma aproximadamente esférica a pesar de estar formado por una combinación de pentágonos y hexágonos planos. Si ponemos una hormiga sobre cada una de esas superficies, cada una de ellas creará que su «espacio-tiempo» local es plano aunque, globalmente, el balón está curvado.

Llegamos así a una concepción de espacio-tiempo no plano. Desde ese momento, la imagen newtoniana de la gravedad como una fuerza de atracción desaparece. Lo que hace realmente una masa gravitatoria, según la visión einsteniana, es curvar el espacio-tiempo a su alrededor.

La nueva teoría de la relatividad general debería poseer de antemano algunas propiedades como: ofrecer los mismos resultados que la mecánica newtoniana en el límite no relativista (velocidades y masas pequeñas); predecir los resultados de la relatividad especial, y ser lo más sencilla posible. Este último es un requisito estético que Einstein aceptó de buen grado, convencido de que el universo podía ser algo complejo, pero no innecesariamente complejo. Tras varios años de esfuerzos, la relatividad general vio finalmente la luz. Era el año 1915.

Quizá no sea adecuado hablar de causa y efecto, sino simplemente de relaciones. El espacio newtoniano planteaba un esquema independiente de los sucesos físicos, algo así como un escenario indiferente a la obra que se representa; como contraposición, el espacio-tiempo que nos presenta la relatividad general es otro actor del escenario. La curvatura del espacio determina el movimiento de la masa, que a su vez perturba y deforma el espacio a su alrededor.

La utilidad de la relatividad general a la hora de describir el universo es indiscutible. Durante el siglo transcurrido desde su nacimiento ha sido sometida a todo tipo de pruebas y, hasta la fecha, las ha superado todas. Cada vez que un experimento parece descubrir una violación de la teoría, los periódicos se llenan de titulares desafiantes estilo «La teoría de Einstein en entredicho», solo para descubrir meses después que el edificio teórico erigido por el genio alemán permanece completamente incólume.

Una primera unificación: gravedad y electromagnetismo

El éxito alcanzado por la relatividad general al describir la gravitación constituyó un aliciente para extender sus métodos al electromagnetismo. El objetivo último, unificar mediante una sola teoría los fenómenos gravitatorios y electromagnéticos, parecía estar al alcance de la mano.

Albert Einstein es el hombre a quien los libros de historia reconocen como el padre de la relatividad, pero no fue ni mucho menos su único progenitor. Otro de sus precursores fue un físico teórico finlandés llamado Gunnar Nordström, cuya entrada en este campo fue casi fortuita. Aunque llegó a la Universidad de Gotinga en 1906 interesado por aprender química con Walther Nernst, un prestigioso físico y químico alemán que ganó el premio Nobel de Química en 1920, su motivación se desvaneció cuando oyó hablar de un nuevo campo de estudio llamado relatividad.

Así, a comienzos de la década de 1910, Einstein y Nordström buscaban de forma independiente las ecuaciones de la relatividad general. El primer intento de Nordström fue un modelo para extender la gravitación newtoniana al campo de la relatividad especial. En él consideró la gravedad como un campo escalar (en contraposición al tratamiento tensorial preferido por Einstein) y no tuvo éxito. Entre otros defectos, fue incapaz de predecir fenómenos como la precesión del perihelio de Mercurio.

Su segunda teoría fue mucho más ambiciosa. En la relatividad especial de Einstein, el tiempo se considera una coordenada más,

MERCURIO Y LA EXTRAÑA PRECESIÓN DE SU PERIHELIO

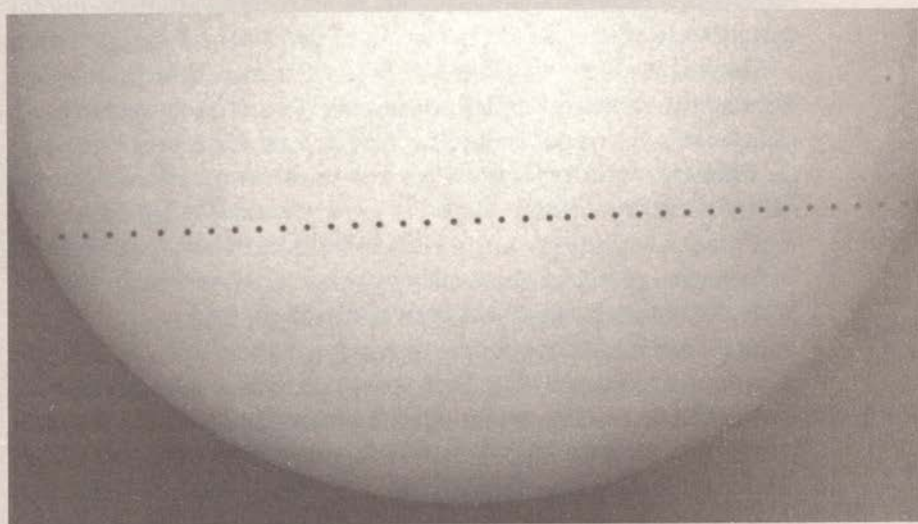
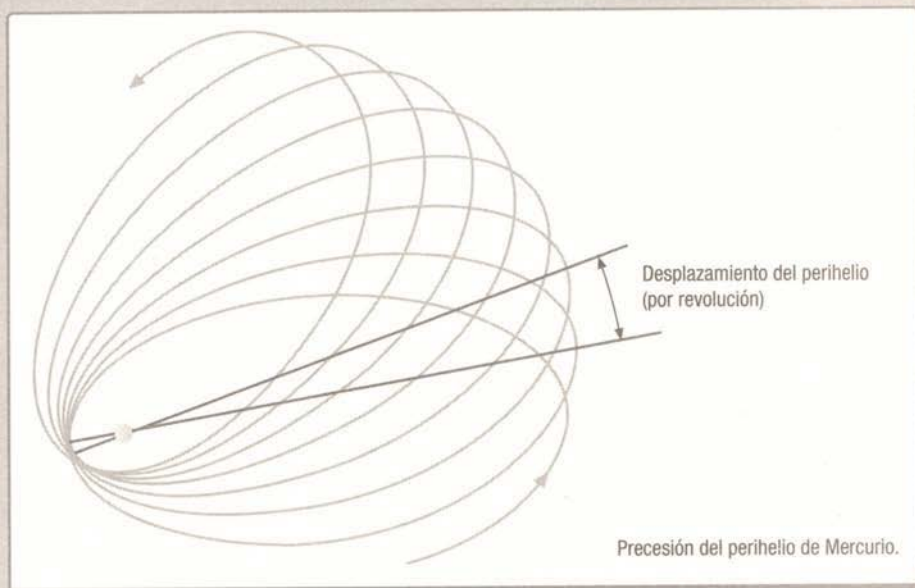
En consonancia con las deducciones experimentales de Johannes Kepler, la ley de gravitación universal estipula que las órbitas de los planetas alrededor del Sol han de tener forma de elipse y que el perihelio, punto de máxima aproximación del planeta al Sol, permanece fijo en el espacio. Pero las medidas orbitales precisas de algunos planetas muestran, por el contrario, que la elipse que recorren los planetas va girando con el tiempo. Eso es por la precesión del perihelio, una desviación en el movimiento de los planetas. Se dice que el punto de perihelio está precesando. La precesión del perihelio se observó en varios planetas pero era más acusada en Mercurio, el pequeño planeta que se encuentra más cercano al Sol. La razón fundamental de este fenómeno es el tirón gravitatorio causado por los otros planetas, especialmente algunos de los que tiene más cerca: Venus, Júpiter y la Tierra. Pero aun descontando esas influencias, quedaba un pequeño efecto residual por explicar en el perihelio de Mercurio: una diferencia de unos 43 segundos de arco que aumentaba cada siglo. Una cantidad pequeña, similar al ángulo que forma una moneda de euro a una distancia de cien metros, pero medible.

Le Verrier y la búsqueda de Vulcano

A mediados del siglo XIX el matemático francés Urbain Le Verrier postuló la existencia de un planeta hipotético para explicar las discrepancias en la órbita de Urano, lo que le llevó al descubrimiento de Neptuno. De forma análoga, sugirió que un planeta muy cercano al Sol, al que bautizó con el nombre de Vulcano, podría ser responsable de la precesión en el perihelio de Mercurio. Durante casi veinte años se buscó a Vulcano, con resultado negativo. Otras hipótesis supusieron la existencia de un anillo en la órbita solar. Hubo incluso quien propuso, directamente, modificar la ley de gravitación universal.

Comprobaciones reveladoras

Cuando Einstein desarrolló la teoría de la relatividad general, una de sus predicciones fue la precesión del perihelio de Mercurio. El efecto aumentaba con la distancia al Sol, y alcanzaba un valor de 42,98 segundos de arco por siglo para Mercurio. En 1947, un conjunto de medidas realizadas en el Observatorio Naval de EE UU arrojó un valor experimental de 43,03 segundos de arco por siglo; posteriormente, otras mediciones más precisas corrigieron el valor hasta 42,98, tal y como predice la relatividad general. El efecto de precesión relativista en una órbita elíptica ha sido comprobado fuera de nuestro sistema solar. El sistema estelar binario PSR 1913+16, situado a más de 20 000 años-luz de distancia de la Tierra, está formado por dos estrellas de neutrones, una de las cuales irradia pulsos de energía electromagnética con una periodicidad determinada. Los tiempos de llegada de este pulsar varían levemente tras un periodo de 7,75 horas, lo que sugiere un fenómeno de precesión de perihelio (en este caso, periastro) similar al de Mercurio, pero más rápido: el pulsar precesa en un día como Mercurio en un siglo. En 1993, los estadounidenses Russell Hulse y Joseph Taylor recibieron el Nobel de Física por el descubrimiento de un nuevo tipo de pulsar, que abrió nuevas posibilidades al estudio de la gravitación.



Mercurio en su tránsito por delante del Sol, una pequeñísima mota en la inmensidad de la gran estrella.

de modo que la formulación matemática ideada por el ruso Hermann Minkowski (autor de la teoría geométrica de los números) une el tiempo con las tres coordenadas espaciales habituales para dar lugar a un espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Nordström fue un paso más allá y propuso la existencia de una quinta dimensión, un concepto que puede parecer poco intuitivo pero, en cualquier caso, legítimo a efectos de cálculo. Si iba a permitir la construcción de una teoría relativista sólida basada en un único campo electro-magnético-gravitatorio, valdría la pena. El nuevo campo de Nordström se reduciría al electromagnetismo de Maxwell en ausencia de gravedad.

El propio Einstein proclamó públicamente en 1913 que los únicos desarrollos relativistas dignos de tener en cuenta eran el de Nordström y el suyo propio. En un momento dado pareció que el finlandés, dotado de un formalismo más sencillo y elegante, acabaría ganando la partida. Pero para su desgracia, la teoría de Nordström falló donde ya antes fallaron otras teorías prometedoras: en su verificación experimental. Su predicción para el movimiento del perihelio de Mercurio fue mucho menor que la esperada y, además, tenía el signo opuesto; tampoco pudo explicar adecuadamente la dilatación del tiempo.

Finalmente, la desviación de la luz estelar en las cercanías del campo gravitatorio del Sol, medida experimentalmente en el famoso eclipse solar de 1919, dio la victoria a la relatividad de Einstein. Para entonces, Nordström había abandonado sus esfuerzos en ese campo y admitido su derrota. En 1918 declinó una plaza de profesor en la Universidad de Berlín para volver a Finlandia, que acababa de alcanzar su independencia. En los años siguientes realizó diversos trabajos de investigación con materiales radiactivos, lo que muy probablemente le causó una temprana muerte en 1923. Tenía cuarenta y dos años de edad.

Aunque fracasó en su intento de crear una teoría de relatividad general, no hay que olvidar que Gunnar Nordström estuvo a punto de conseguirlo. También es meritorio el hecho de que fue el primero en atreverse a postular la existencia de dimensiones adicionales a las cuatro habituales de espacio + tiempo. Muchos investigadores seguirían sus pasos en décadas sucesivas, e inclu-

so en nuestros días, las teorías más prometedoras de unificación de fuerzas tienen, prácticamente sin excepción, un tratamiento multidimensional.

LA MALA ELECCIÓN DE MIE Y HILBERT

Newton afirmó en una ocasión que llegó tan lejos porque había subido a hombros de gigantes. Lo mismo puede aplicarse a Einstein. El genio alemán se apoyó en grandes matemáticos como Hermann Minkowski o Marcel Grossman, su colaborador, para edificar su teoría de la relatividad. El nuevo universo relativista dependía en forma crítica de las matemáticas avanzadas, por lo que los mejores en esta disciplina fueron los más indicados para unificar la relatividad y el electromagnetismo.

Necesitamos saber. Y sabremos.

DAVID HILBERT

Entre ellos, el alemán David Hilbert, quien fue sin discusión uno de los mejores matemáticos del siglo xx. Sus contribuciones en diversos campos de la ciencia son demasiado numerosas para enunciarlas siquiera. Por poner un ejemplo, los operadores matemáticos utilizados actualmente en mecánica cuántica se definen dentro de lo que se llama un espacio de Hilbert (un espacio matemático, no físico). En 1900 compiló una famosa lista de 23 problemas de matemáticas no resueltos, algunos de los cuales, considerados míticos dentro de la comunidad matemática, siguen sin estarlo todavía.

Hilbert comenzó a inclinarse por la física en 1910 y pocos años después se centró en los interrogantes derivados de la recién descubierta relatividad general. De hecho, publicó una derivación de las ecuaciones de esa teoría pocos días después de que lo hiciera el propio Einstein. Pero, a pesar de que en ocasiones se ha querido suscitar una polémica sobre la primicia del descubrimiento, el mismo Hilbert reconoció siempre la prioridad del genio alemán.

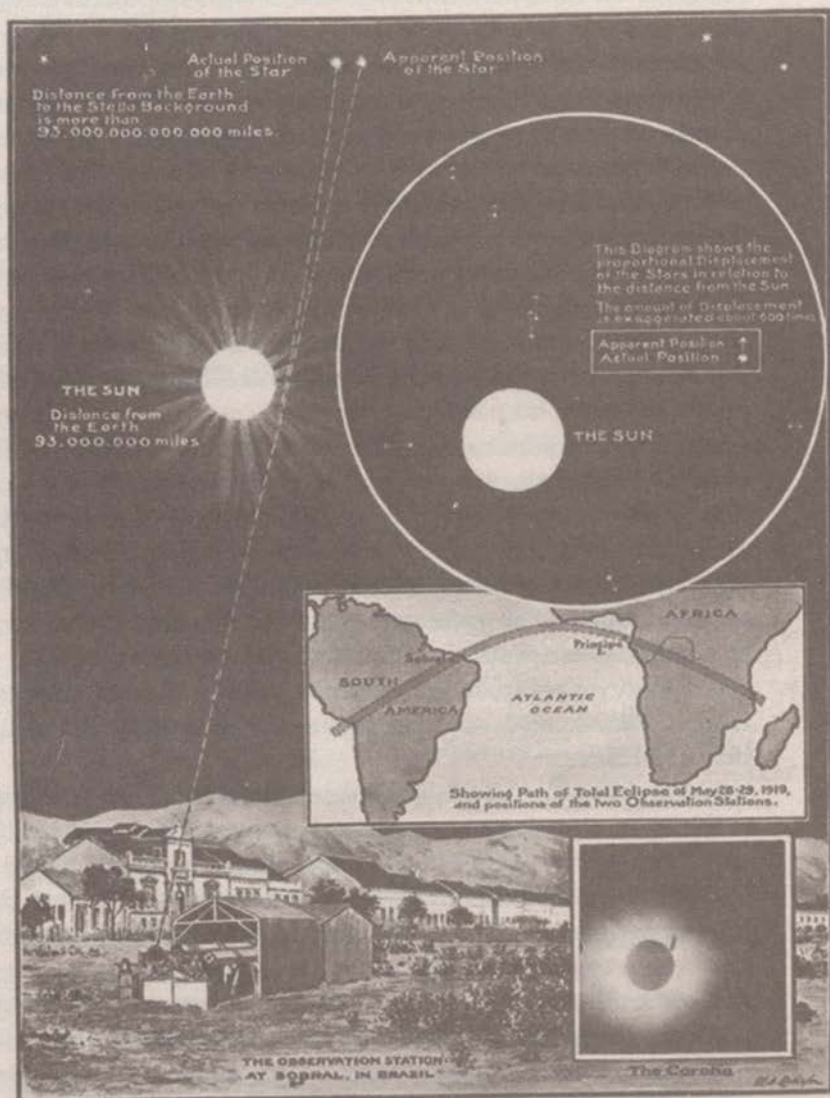
Dada su trayectoria matemática, cuando Hilbert decidió centrar sus esfuerzos en la unificación de las fuerzas gravitatoria

EL ECLIPSE QUE CONVIRTIÓ A EINSTEIN EN UNA LEYENDA

Si un rayo de luz pasa cerca de un cuerpo masivo, resulta desviado por efectos de la gravedad. Este hecho es un factor distintivo de la teoría de la relatividad general de Einstein, y su predicción confirmó su validez. Pero esa doble afirmación es cierta solo en parte. La teoría de gravitación de Newton ya predijo un efecto de desviación. Partiendo de la suposición de que la luz está compuesta por partículas, en 1804 el físico alemán Johann Georg von Soldner calculó que un rayo de luz que pasase de forma rasante junto al Sol sería desviado en un ángulo de 0,87 segundos de arco. En 1911, Einstein usó su teoría de la relatividad especial para calcular un valor igual; cuando desarrolló su teoría general, esa desviación se hizo doble: 1,75 segundos de arco. La comprobación experimental resulta difícil de llevar a cabo, pero puede hacerse durante un eclipse de Sol, cuando nuestro astro rey queda oculto tras la Luna. En ese momento pueden medirse las posiciones de las estrellas cercanas al Sol, compararlas con sus posiciones reales y estimar la desviación, lo que requiere de instrumental de precisión y cielos limpios. Y también un poco de suerte, circunstancia que no abundó en la década de 1910, durante la que se intentaron llevar a cabo varias observaciones para comprobar esos datos. La primera expedición, organizada por el Observatorio Nacional Argentino, viajó a Brasil en 1912 para observar un eclipse total de Sol ese 10 de octubre, pero fracasó debido a la lluvia. Peor suerte tuvo la expedición alemana. Los integrantes del Observatorio de Berlín intentaron realizar sus observaciones en la península de Crimea durante el eclipse del 21 de agosto de 1914. Habían pasado apenas tres semanas tras el inicio de la Primera Guerra Mundial y fueron capturados por el ejército ruso. De la misma forma, la crisis generada por la guerra impidió una buena observación del eclipse de febrero de 1916 en Venezuela, y el muy esperado eclipse de junio de 1918 en Estados Unidos, al carecer del instrumental adecuado, no arrojó resultados concluyentes.

Comprobaciones reveladoras

La ocasión propicia llegó el 29 de mayo de 1919. El astrónomo inglés Arthur Eddington, en un intento por reconciliar a británicos y alemanes tras la Primera Guerra Mundial, se embarcó hacia la Isla del Príncipe, en el golfo de Guinea, para verificar la teoría de la relatividad. Sus mediciones dieron un valor para la desviación de la luz de 1,61 segundos de arco. Una segunda expedición a Brasil organizada por el Real Observatorio de Greenwich usó dos instrumentos de observación que arrojaron valores dispares: 1,98 y 0,93 segundos de arco. Eddington juzgó que la medida del segundo instrumento era de peor calidad porque su espejo había sido afectado por el calor del Sol. Luego, promedió las otras dos observaciones y concluyó un valor de 1,75 segundos de arco, coincidiendo con la predicción de Einstein. En años posteriores se criticaría la decisión de Eddington de «olvidar» los datos de peor calidad. Pero una revisión efectuada en 1979 confirmó que el valor real dado por el segundo instrumento coincidía también con la predicción de Einstein, dentro de los márgenes de error experimental. En cualquier caso, no importó. Para los científicos, la expedición de 1919 confirmó la validez de la teoría de la relatividad general; para el hombre de la calle, el nombre de Einstein se convirtió en leyenda.



Página del *Illustrated London News* que reflejaba las observaciones astronómicas de la expedición liderada por Arthur Eddington para seguir el eclipse de Sol de mayo de 1919 desde Sobral, en Brasil.

y electromagnética se encontró en posición de ventaja. Pocas personas de su época contaban con una mente tan privilegiada como la suya en lo que respecta a las matemáticas. Pero, lamentablemente, se equivocó al cimentar su nueva teoría en una particular visión del electromagnetismo propuesta por el físico alemán Gustav Mie, en la que recuperaba la ya entonces obsoleta teoría del éter.

En 1910, Mie había publicado un libro de texto donde el electromagnetismo se convertía en una nueva teoría del éter. Esa sustancia sutil que supuestamente permitía la transmisión de las ondas electromagnéticas (y que el experimento de Michelson y Morley había desacreditado veinte años antes) fue considerada por Mie como la clave para la comprensión de nuestro mundo. Según su visión, las partículas materiales eran como nudos en el éter, conglomerados que pueden ser explicados mediante electricidad y magnetismo.

Los intentos de Mie por desarrollar un formalismo relativista similar al de Einstein tuvieron escaso éxito. Lo cierto es que Mie nunca estuvo cerca de lograr el objetivo de la unificación entre las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias; sin embargo, al comienzo su teoría parecía muy prometedora. Su visión de una materia constituida por «grumos» de éter parecía sugerir el camino hacia la unificación entre masa y electromagnetismo que buscaba Hilbert.

Ni siquiera el prodigioso talento matemático de Hilbert logró resolver las dificultades que encerraba una teoría que, como hoy sabemos, estaba condenada al fracaso. En la versión inicial de su formalismo, el electromagnetismo se definía como la interacción fundamental a partir de la cual se deriva la gravitación; pronto tuvo que rectificar y adoptar una versión opuesta centrada en la gravedad. Finalmente, tuvo que darse por vencido. Su intento por extender la teoría de la relatividad no fructificó, aunque sus más que notables contribuciones matemáticas en multitud de campos siguen siendo ampliamente reconocidas.

En cuanto a Gustav Mie, también alcanzó el reconocimiento de la comunidad científica, aunque por motivos muy diferentes. Su manual sobre electromagnetismo, publicado en 1910 y consi-

derado por él mismo la obra más relevante de su carrera, cayó en el olvido salvo como ejemplo de teoría fallida. Sin embargo, dos años antes, en 1908, publicó un artículo sobre la interacción entre ondas electromagnéticas y partículas esféricas en suspensión coloidal, basado en las ecuaciones de Maxwell, que resultó mucho más fructífero. Los resultados de ese artículo conformaron lo que en la actualidad se denomina *teoría de Mie*, y la interacción entre luz y esferas denominada *dispersión de Mie*, es ampliamente conocida y usada en áreas como la física de la atmósfera.

HERMANN WEYL Y SU INTRADUCIBLE *GAUGE*

Sin duda, Hilbert fue uno de los grandes matemáticos del siglo xx que se sintieron atraídos por la nueva relatividad general descubierta por Einstein, un campo que requería de herramientas matemáticas avanzadas, en algunos casos aún por desarrollar. Pero el nombre de Hermann Weyl debe unirse a la lista, porque, a pesar de no alcanzar el éxito, suyo es el mérito de abrir una vía de trabajo que sigue desarrollándose en nuestros días: la de las teorías *gauge*.

Traducir el término *gauge* al castellano es tarea difícil, puesto que su significado en física es bastante distinto al del habla cotidiana. Se ha intentado traducir como *norma*, *calibre*, *galga*, *aforo* y otros términos, pero no hay consenso en cuanto a cuál es el término más adecuado; quizá por eso los científicos del ramo tienden a usar el vocablo inglés. Aunque, para mayor complicación, *gauge* es la traducción al inglés de un término alemán que significa algo así como «calibración» o «graduación».

Pero lo importante, más que consensuar su traducción más correcta, es entender su significado. El concepto de *gauge* implica grados de libertad redundantes que pueden reducirse mediante una transformación adecuada. Para entenderlo, imaginemos que calculamos la velocidad de un cuerpo que ha sido arrojado desde cierta altura. Una manera de hacerlo es calculando la energía mecánica total, que no es sino la suma de su

energía cinética y su energía potencial, y utilizar el principio de conservación de la energía (que afirma que la cantidad total de energía de cualquier cuerpo físico aislado permanece invariable con el tiempo).

Recordemos ahora que la ley de gravitación universal de Newton nos indica que el valor de la energía potencial de un cuerpo de masa m , en una región con aceleración gravitatoria g , es $U = mgh$, donde h es la altura del cuerpo. Pero, altura... ¿en relación a qué punto? En realidad disponemos de un grado de libertad indeterminado, en el sentido de que es posible escoger la posición $h = 0$ de diversas maneras. Podemos hacer $h = 0$ al nivel del suelo, o en la azotea del laboratorio, o a una altura de 1552 metros: donde nosotros queramos.

Tenemos, por tanto, la libertad de hacer nuestra elección de $h = 0$ sin restricciones, en el entendido de que el resultado, y en último término, el principio físico que estamos utilizando, no se verá afectado. Las leyes gravitatorias son en este caso invariantes frente a cambios en la elección de nuestro origen de alturas (figura 1).

El *gauge* es una extensión de este concepto. En determinadas condiciones podemos escoger un *gauge* (algo así como la altura inicial de nuestro ejemplo), lo que permite definir una teoría *gauge* de forma que resulte invariante frente a ciertas transformaciones. Los ejemplos de *gauge* en campos como la relatividad suelen ser complicados, ya que aparecen en forma de derivadas, y las reglas que determinan su valor imponen restricciones a la forma que deben tener las ecuaciones físicas.

Las ecuaciones de Maxwell resultan covariantes (es decir, no cambian) ante transformaciones *gauge*. Eso dio motivos a Weyl para pensar que quizá fuese posible extender esa covariancia al campo gravitatorio y, de ese modo, intentó unificar el electromagnetismo y la gravedad. Fue el primero que trató de aplicar el concepto de *gauge* a una teoría, y sus esfuerzos ayudaron a popularizar el término. Muchos otros investigadores futuros aplicarían ese concepto en teorías de campo unificado.

En 1918, Weyl formuló una teoría *gauge* aplicable al formalismo de la relatividad general. Su idea fue considerada elegante

FIG. 1

$$\begin{aligned}\Delta U &= mgb - mga \\ &= mg(b - a) \\ &= mgH\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= mgd - mgc \\ &= mg(d - c) \\ &= mgH\end{aligned}$$

La diferencia de energía potencial ΔU no depende de la elección de una determinada altura de referencia. En términos cuánticos, la fuerza gravitatoria es invariante frente a un cambio de *gauge*.



por diversos científicos de su tiempo, pero en su interior acechaba un error fatal que Einstein, colega y amigo suyo, vio claramente desde el principio.

Y es que, según la teoría de Weyl, la forma en que un reloj mide el tiempo no depende solamente de su posición actual, sino de las posiciones en las que ha estado anteriormente. Si en lugar de un reloj nos referimos a un átomo de hidrógeno, el conjunto de frecuencias en las que emitirá radiación dependerá de su ubicación tanto actual como pasada. Dicho de otra forma, el comportamiento del átomo dependerá de su historia, lo que contradice la evidencia experimental, ya que podemos observar átomos de hidrógeno radiando por todo el espacio, y todos lo hacen de la misma manera.

Hermann Weyl siguió intentando mejorar su teoría hasta que en 1921 se dio por vencido y dedicó sus esfuerzos a diversos campos matemáticos: teoría de grupos, álgebra, tensores... Sin embargo, algunas de sus contribuciones a la relatividad general siguen vigentes, como el llamado *tensor de Weyl*, que forma

UN GAUGE NO ALTERA EL ELECTROMAGNETISMO

Se puede describir un campo electrostático en función de su potencial eléctrico V . La fuerza que actúa sobre una partícula cargada y sus cambios energéticos está relacionada con la diferencia de potencial entre dos puntos. Una pila de 1,5 V indica la diferencia de potencial $\Delta V = V_2 - V_1$ entre ambos bornes. Desconocemos el potencial en uno de ellos, pero si sumamos una cantidad constante C al potencial en cada punto, la diferencia será la misma, pues $(V_2 + C) - (V_1 + C) = V_2 - V_1 = \Delta V$. Así, la actuación de los electrones será invariante frente a una elección de la constante C . Para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos se requieren las ecuaciones de Maxwell, donde los campos eléctrico \mathbf{E} y magnético \mathbf{B} se expresan mediante el potencial V y el potencial vector \mathbf{A} :

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

donde el símbolo triangular («operador nabra») indica una serie de derivadas espaciales y ∂ , una derivada temporal. Se pueden modificar los potenciales V , \mathbf{A} para que los campos magnéticos no cambien. Si una función f que dependa de la posición y del tiempo se transforma así:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla f \quad V' = V - \frac{\partial f}{\partial t}$$

Las nuevas definiciones de campo eléctrico (\mathbf{E}') y magnético (\mathbf{B}') serán:

$$\mathbf{E}' = -\nabla V' - \frac{\partial \mathbf{A}'}{\partial t} \quad \mathbf{B}' = \nabla \times \mathbf{A}'$$

Expresando el nuevo campo eléctrico en función de los potenciales (V , \mathbf{A}) obtenemos:

$$\mathbf{E}' = -\nabla V' - \frac{\partial \mathbf{A}'}{\partial t} = -\nabla V + \nabla \frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{\partial \nabla f}{\partial t}$$

Como los operadores de derivada espacial (nabra) y temporal (∂) son conmutativos, pueden cambiarse de orden, dos de los elementos del último término se anulan, dando como resultado:

$$\mathbf{E}' = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{E}$$

De forma similar para el campo magnético:

$$\mathbf{B}' = \nabla \times \mathbf{A}' = \nabla \times (\mathbf{A} + \nabla f) = \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times (\nabla f)$$

Según el operador nabra el último sumando es igual a cero, por lo que tenemos: $\mathbf{B}' = \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$. De esta forma podemos alterar los potenciales (V , \mathbf{A}) escogiendo cualquier *gauge* o función f sin alterar las ecuaciones de Maxwell.

parte de las ecuaciones de campo de Einstein. Incluso su tratamiento de los campos *gauge* resultó cómodo para el naciente campo de la mecánica cuántica, donde ha encontrado un fértil nicho hasta nuestros días.

EL ASUNTO DE LAS DIMENSIONES ENROLLADAS

Dos años después del fallecimiento de Gunnar Nordström, la idea de una quinta dimensión volvió a renacer con un planteamiento diferente. Nordström, al introducir una dimensión adicional al espacio-tiempo, planteó una mera herramienta matemática sin significado físico alguno y, como ya advirtió Ernst Mach, un físico austríaco que ejerció una gran influencia sobre el pensamiento de Einstein, el uso de más de tres dimensiones espaciales solo era admisible como apoyo matemático. No se debía ir más allá.

Entre otros motivos, el planteamiento de Nordström se demostró inviable porque este había utilizado la relatividad especial, de aplicación más restringida. El mérito de intentarlo por vez primera en el nuevo marco teórico de la relatividad general correspondió al matemático alemán Theodor Kaluza. En 1919, Kaluza intentó resolver esas mismas ecuaciones en un espacio de cinco dimensiones (cuatro espaciales y una temporal), y descubrió que las ecuaciones de la relatividad general por un lado, y las del electromagnetismo por otro, surgían de modo natural.

¿Cómo lo consiguió? Su éxito fue debido a un detalle: consideró la quinta dimensión como una dimensión espacial real y, en cierto modo, separada de las otras cuatro. Como resulta difícil imaginar el concepto de cinco dimensiones, pondremos un ejemplo tridimensional. Imaginemos por un momento que vivimos en un universo plano de dos dimensiones (olvidemos el tiempo por un momento). Nos movemos libremente a lo largo y ancho de una hoja plana.

Ahora supongamos que enrollamos esa hoja hasta formar un cilindro. De repente, la situación cambia. Ya no es lo mismo viajar en una dirección que en otra. Un movimiento perpendicular

al eje del cilindro nos hará volver a la posición de partida, mientras que moverse en la dirección del eje nos llevará por un camino de distinta longitud y propiedades (figura 2).

Cuando Kaluza desarrolló su teoría pentadimensional observó que sus resultados arrojaban dos conjuntos de ecuaciones: las de la relatividad general de Einstein y las del electromagnetismo. Debió de ser para él uno de esos maravillosos «momentos eureka», preludio de grandes descubrimientos teóricos. Kaluza escribió a Einstein en 1919, y este le animó a publicar su teoría, cosa que hizo en 1921.

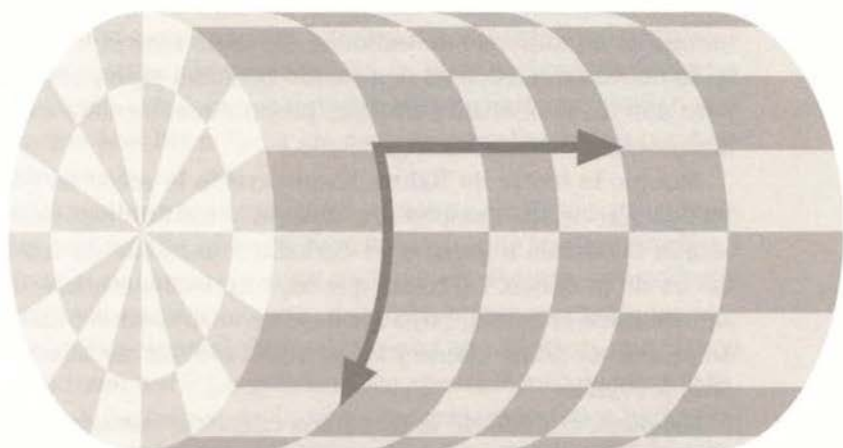
A pesar del apoyo del genio alemán, al principio la novedosa teoría de Kaluza no tuvo mucho éxito. Inventarse una dimensión para meros efectos de cálculo era aceptable, pero la introducción de una dimensión física real era algo que la comunidad científica no estaba dispuesta a tomarse a la ligera. La vida profesional de Kaluza se hizo difícil. Era 1926 y Kaluza llevaba casi dos décadas en la Universidad de Königsberg como *privatdozent*, un cargo de profesor no permanente. Ciertamente, hablar de nuevas dimensiones no le ayudó a prosperar. Más bien alejó las posibilidades de un ascenso.

Fue entonces cuando apareció en escena la persona cuyo nombre ha quedado asociado al suyo en los anales de la física: Oskar Klein, un físico teórico sueco que se convirtió en el complemento ideal para el matemático Kaluza. Klein decidió tomar la teoría de Kaluza y añadirle los principios de la mecánica cuántica, campo que estaba entonces en pleno auge, para postular una descripción física de esa quinta dimensión. De acuerdo con la idea de Klein, dicha dimensión era una especie de bucle circular.

La situación nos recuerda a la de una tira de velcro, donde cada punto de la superficie es en realidad un minúsculo ganchito (figura 3). El espacio sería algo similar, con pequeñas circunferencias cerradas en cada punto, lo que permite *compactificar* o enrollar esa dimensión extra de una forma que no suele manifestarse en nuestra vida cotidiana.

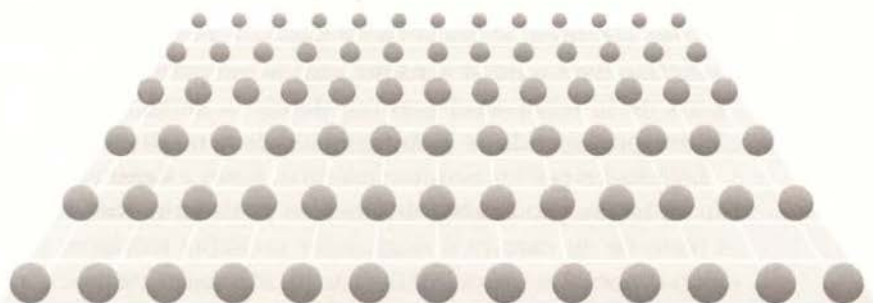
La pregunta surge de inmediato: si esa quinta dimensión existe, ¿por qué no podemos verla? Klein, usando argumentos de mecánica cuántica, afirmó que es demasiado pequeña para poder

FIG. 2



Diferentes desplazamientos en dimensiones «enrolladas». La superficie tiene propiedades distintas según nos movamos en una dirección u otra. Si el radio del cilindro fuese mucho más pequeño que su longitud, una criatura que viviese en la superficie del cilindro no percibiría los desplazamientos perpendiculares al eje.

FIG. 3



Dimensiones compactificadas en forma de circunferencia. Si fuesen de tamaño infimo, no podríamos percibir las o experimentar con ellas. Serían dimensiones «plegadas» en un espacio multidimensional.

observarla. El radio del bucle que representa la quinta dimensión sería del orden de 10^{35} metros, una longitud ínfima más allá de todo lo imaginado hasta entonces: el radio de un protón sería un millón de millones de millones de veces mayor. Ciertamente, la nueva dimensión es demasiado pequeña para poder verla, pero aun así la libertad extra que proporciona permite explicar la existencia del electromagnetismo.

Aunque la teoría de Kaluza-Klein parecía la solución para la unificación de los campos gravitatorio y electromagnético, no estaba destinada a ganarse el corazón y la mente de los científicos de la época. La teoría que les interesaba era la novedosa mecánica cuántica, cuyo formalismo matemático había sido ampliamente desarrollado y les permitía evaluar cantidades con gran precisión.

Así pues, el éxito de la mecánica cuántica, sumado a la dificultad de la verificación experimental y los fallos de la propia teoría, ahogaron las posibilidades de la teoría de Kaluza-Klein. Una de las predicciones de dicha teoría, derivada de la nueva dimensión espacial extra, era la existencia de una partícula sin masa, sin carga y de espín cero (el espín es una propiedad física de las partículas subatómicas) que nunca había sido observada. Otro problema vino dado por el grado de compactificación de la dimensión extra. El tamaño de ese minúsculo bucle está relacionado con el valor de la carga eléctrica de las partículas y, puesto que no vemos electrones o protones con valores cambiantes de la carga eléctrica, el bucle ha de tener un tamaño determinado e idéntico para todo el espacio; algo incompatible con los principios de la relatividad general, donde la geometría del espacio-tiempo depende de la distribución de la masa y la energía.

Eclipsados por los acontecimientos, Klein y Kaluza abandonaron su teoría pocos años después de postularla. Kaluza dedicó el resto de su carrera a desarrollar modelos atómicos y Klein efectuó notables descubrimientos en mecánica cuántica, como el desarrollo de la primera ecuación de onda relativista, conocida hoy con el nombre de ecuación de Klein-Gordon.

El propio Einstein jugó con cinco dimensiones en los años siguientes a la aparición de la teoría de Kaluza-Klein, pero esta

parecía condenada al olvido. Sorprendentemente, la idea básica de incluir dimensiones espaciales extra con contenido físico y de forma compacta fue retomada medio siglo después, cuando los científicos ya no trataban con dos fuerzas fundamentales sino con cuatro. Esto condujo a la idea de introducir varias dimensiones extra, tan compactificadas que no se pueden medir, lo que nos llevó hasta las teorías actuales de las once dimensiones.

Resulta interesante ver cómo el *gauge* de Weyl y las dimensiones compactificadas de Kaluza-Klein, dos ideas iniciadas a comienzos del siglo xx para unificar las fuerzas conocidas y descartadas en su momento, dominan el panorama de las teorías de unificación del siglo xxi. Al igual que Newton, que afirmó haber llegado tan lejos gracias a las aportaciones de sus predecesores, el desarrollo de la física teórica pudo tener lugar gracias a planteamientos anteriores, aun cuando algunos de ellos acabaron siendo fallidos.

Y es que, indudablemente, las buenas ideas no mueren. Tan solo dormitan, a la espera de su «momento eureka».

Relatividad y cuántica, ¿dos teorías incompatibles?

En la década de 1930, la mecánica cuántica y la relatividad general eran las dos grandes teorías que explicaban el mundo de lo muy grande y de lo muy pequeño. Conseguir que el mundo pudiese ser cuántico y relativista a la vez se convirtió en un tema de gran trascendencia, pero ni los relativistas de Einstein ni los cuánticos de Bohr estaban dispuestos a dar su brazo a torcer.

El nombre de Albert Einstein está indisolublemente ligado a la teoría de la relatividad y no es de extrañar, ya que fue su principal artífice. Con todo, el genio de Ulm realizó aportaciones a otros campos que, por sí solos, constituirían un triunfo sin paliativos para cualquier científico. En particular, los trabajos de Einstein en relación a la mecánica cuántica lo convirtieron en uno de los pioneros en ese nuevo campo, hasta el punto de que ganó el premio Nobel de Física por su explicación del efecto fotoeléctrico, y no por su descubrimiento de la relatividad. Sin embargo, cada vez que oímos su nombre lo asociamos inmediatamente a la relatividad y no a la cuántica.

Lo cierto es que sus méritos en teoría cuántica fueron eclipsados por el arrollador éxito de sus teorías de la relatividad (primero la especial y luego la general), pero también hay un factor adicional: Einstein nunca se encontró cómodo con la mecánica cuántica. Aunque la nueva teoría predecía y explicaba fenómenos experimentales con una precisión asombrosa, al maestro alemán le disgustaba profundamente su carácter probabilista y no causal.

Para entenderlo debemos volver a la era de Newton. Sus tres leyes de la mecánica garantizaban que, conociendo las fuerzas

que actúan sobre un cuerpo y sus condiciones iniciales (la velocidad y la posición en el instante inicial), pueden calcularse todo tipo de variables cinemáticas. En principio, podemos saber con precisión absoluta cuánto tiempo tardará un determinado cuerpo en superar los mil kilómetros por hora, en qué punto se detendrá o qué aceleración tiene en todo momento.

En cambio, uno de los principios de la mecánica cuántica estipula que podemos conocer la velocidad o la posición de un objeto con una precisión arbitrariamente alta, pero no ambas variables a la vez. Expresado mediante el principio de indeterminación de

Heisenberg, la precisión con que podemos conocer la posición Δx y el momento lineal $\Delta(mv)$ viene regulada por la desigualdad $\Delta x \cdot \Delta(mv) \geq h/4\pi$, donde h es la constante de Planck.

Durante un tiempo, Einstein se dedicó a buscar formas que contrarrestaran el principio de incertidumbre. Diseñaba experimentos imaginarios (sus famosos *gedenkenexperimenten* o «experimentos mentales») en los que se podía, en principio, medir velocidades y posiciones con precisión arbitraria. Pero siempre era refutado con éxito, por lo general por el danés Niels Bohr, figura formidable en el campo de la mecánica cuántica. En la actualidad, se acepta que la desigualdad de Heisenberg representa una limitación básica de la naturaleza, independientemente de lo ingeniosos que podamos ser los seres humanos realizando experimentos.

El carácter estadístico y azaroso de la nueva física cuántica también disgustaba a Einstein. Porque en lugar de indicar la posición de una partícula, como máximo indica la probabilidad de que se encuentre en cierta región del espacio. Eso se debe a que tiene una probabilidad no cero de estar en múltiples lugares y que, solo cuando la miremos, podremos saber dónde se encuentra.

Todo ello preocupaba profundamente a Einstein, quien tenía la convicción de que no es así como debería funcionar la naturaleza. Finalmente, el carácter causal de la mecánica cuántica fue

– Creo que Dios no juega a los dados con el universo.

– Einstein, deje de decirle a Dios lo que tiene que hacer.

BOHR RESPONDE A UNA CRÍTICA DE EINSTEIN A LA MECÁNICA CUÁNTICA

una fuente de quebraderos de cabeza para Einstein. El principio de causalidad clásica indica que un efecto sigue a una causa: se pulsa un botón (causa) y el ascensor sube (efecto). Estamos acostumbrados a la causalidad y tendemos a verla como algo lógico y de sentido común, pero eso es precisamente lo que le falta al mundo cuántico. En particular, ninguna norma cuántica estipula que los cuerpos o la información no puedan viajar a mayor velocidad que la luz, lo que en relatividad especial implica el fin de la causalidad.

EL EXPERIMENTO EPR: LA PARADOJA DE EINSTEIN, PODOLSKI Y ROSEN

Superar la barrera de la luz fue probablemente el factor determinante por el cual Einstein se opuso a la mecánica cuántica tal y como estaba planteada entonces. El principio de causalidad o el carácter azaroso de las leyes naturales son cosas que pueden no gustar, pero con las que un científico puede vivir. Ahora bien, violar el límite de la velocidad de la luz era algo que el descubridor de la relatividad general no estaba dispuesto a tolerar. Por ello, utilizó ese principio para imaginar un experimento mental que, en su opinión, demostraría de una vez por todas que la mecánica cuántica, aunque exitosa, no era una representación completa de la realidad.

En mayo de 1935 la revista *Physical Review* publicó un artículo titulado «¿Puede considerarse completa la descripción de la realidad física mecanocuántica?» donde se presentó la que desde entonces se conoce como *paradoja EPR* (por las iniciales de los autores: Albert Einstein y los norteamericanos Boris Podolski y Nathan Rosen). Para explicarla, no recurriremos al original de ese artículo, sino que nos basaremos en la reformulación de la paradoja EPR propuesta por Bohm y Aharonov en 1957.

Supongamos que hacemos chocar un electrón y un positrón (partículas con la misma masa y carga eléctrica, el primero negativa y el segundo positiva) y que ambas partículas se aniquilan dando lugar a dos fotones, que llamaremos A y B. En el proceso,

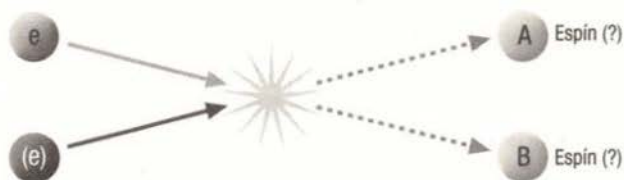
por supuesto, se ha de conservar la energía del sistema, pero hay otra cantidad que debe conservarse, llamada espín, que, recordemos, es una propiedad intrínseca de las partículas atómicas. El electrón y el positrón tienen un espín total igual a cero y, por tanto, también los dos fotones que surgen del choque de ambos. Como un fotón tiene el espín igual a la unidad, de ello resulta que uno de los fotones tiene espín $+1$ y el otro tiene espín -1 .

En el mundo clásico podemos medir el espín de los fotones para averiguar cuál tiene espín $+1$. En el mundo cuántico también, pero con una particularidad: mientras no efectuemos la medida, no podemos asignarle un espín concreto a ningún fotón. Cada uno de ellos está en una superposición de estados de espín $+1$ y -1 , de modo análogo a como el gato de Schrödinger encerrado en su caja está a la vez vivo y muerto. Cuando observemos el fotón A, sabremos el valor definido del espín en ese momento (figura 1). Digamos que dicho espín es $+1$. Puesto que el espín total debe ser cero, concluiremos que el espín del otro fotón ha de ser -1 sin que necesitemos medirlo para saberlo.

Hasta ahora, solamente hemos demostrado que podemos conocer el espín del fotón B observando el fotón A, pero ahora viene la parte interesante. Tomamos los fotones A y B, los metemos en cajas (para que nadie pueda observarlos) y los separamos. Podemos tomar el fotón B y enviarlo muy lejos, por ejemplo al otro extremo de la galaxia. Nuevamente medimos el fotón A y sale espín $+1$, y eso nos dice que el espín del electrón B ha adoptado el valor -1 (figura 2). Y aquí está el problema: ¿cómo puede el fotón B «saber» que su espín es -1 ? ¿Cómo se transmite esa información de modo instantáneo a millares de años luz de distancia?

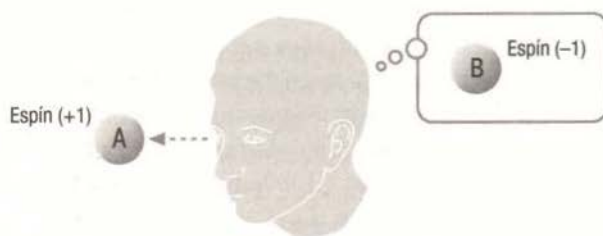
A una distancia tan enorme, la lógica nos dice que ambos fotones deberían ser independientes —según el principio de localidad—, y aun si hubiese alguna interacción entre ellos esta debería viajar, como máximo, a la velocidad de la luz, de acuerdo a la relatividad especial. Pero el experimento de los fotones nos dice que esa información se transmite de algún modo mediante una «acción fantasma» a una velocidad prácticamente infinita, lo que viola tanto la relatividad como el principio de localidad. ¿O

FIG. 1



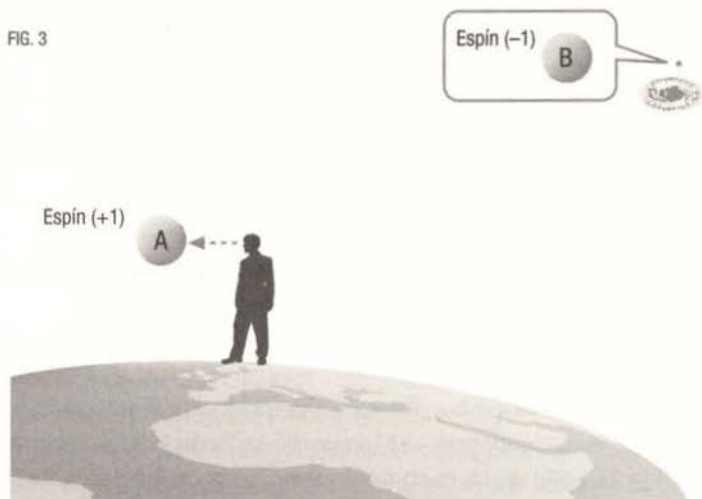
Una colisión electrón + positrón crea dos partículas A y B con valores de espín desconocido.

FIG. 2



Si la partícula A tiene espín +1, ya sabemos que la partícula B tendrá espín -1 aunque no la midamos.

FIG. 3



¿Cómo puede «saber» la lejana partícula B que tiene espín -1? Transmitir esa información de forma instantánea parece violar la relatividad de Einstein.

es que, quizá, las partículas ya sabían qué espín les correspondía antes siquiera de iniciar su viaje?

Einstein apostaba por la segunda posibilidad. En su opinión, la mecánica cuántica estaba incompleta, porque no proporciona una descripción completa de la realidad. Dicha descripción vendría dada por un conjunto de «variables ocultas», propiedades a las que no tenemos acceso (quizá porque resulta imposible debido a algún principio básico, o porque no hemos sido capaces de encontrarlas por el momento) pero que, de conocerlas, nos darían toda la información posible sobre el sistema.

Según esta interpretación, los fotones A y B parten con valores de espín ya prefijados. Cuando medimos el espín del fotón A y nos da $+1$, deducimos que el fotón B tiene espín -1 (figura 3); pero no es que esa información haya viajado a velocidad infinita en virtud a una acción fantasma, sino que sencillamente el fotón B siempre ha tenido un espín -1 . Como las variables ocultas son locales, sabemos que no ha habido acción a distancia entre los dos fotones.

Niels Bohr y otros físicos discreparon de esa idea. Para ellos, el comportamiento del sistema de fotones A y B, al tener un origen común, están descritos mediante una función matemática llamada *función de onda*. Esa función, que describe la superposición de todos los posibles estados cuánticos, tiene valores en todo punto del espacio. Incluso si ambos fotones se encuentran en regiones opuestas de la galaxia, la función de onda que los describe sigue siendo una sola. Cuando uno de los fotones es observado, la función de onda adopta un solo estado, digamos el de espín $+1$ para el fotón A y espín -1 para el fotón B; y lo hace de modo instantáneo.

El debate estaba servido: la relatividad especial, la localidad y las variables ocultas contra la completitud de la mecánica cuántica. Bohr y Einstein discutieron vivamente durante años, sin convencerse ni dejarse convencer. En 1964, dos años después de la muerte de Bohr y nueve tras la de Einstein, el físico John Bell publicó un artículo donde planteaba que la forma de saber quién tenía razón era experimentando y calculando. Una relación llamada *desigualdad de Bell* permitiría saber si existen

las variables ocultas o no. Desde entonces se han llevado a cabo diversos experimentos y, aunque persiste cierta polémica por la interpretación de los resultados, el consenso general es que el ganador es Niels Bohr; o mejor dicho, la mecánica cuántica. Dos partículas que han interactuado y comparten la misma función de onda (lo que se conoce como *partículas entrelazadas*) pueden comunicarse, aparentemente, más rápido que la luz. Como a esas velocidades superlumínicas no existe realmente transferencia de energía o de información, no se violan los principios de la relatividad especial.

En nuestros días, el entrelazamiento cuántico es un fenómeno que está dando lugar a multitud de descubrimientos, algunos aparentemente paradójicos (como el hecho de que una partícula pueda entrelazarse con otra que aún no exista), y está abriendo campos tan novedosos como la criptografía cuántica o el teletransporte.

INCOMPATIBILIDAD DE CARACTERES ENTRE AMBAS TEORÍAS

Es cierto que el sueño de Einstein de mostrar la incompletitud de la teoría cuántica mediante la paradoja EPR no surtió efecto pero, incluso en el caso de haber salido victorioso, se hubiera enfrentado a otros obstáculos fundamentales que todavía hoy impiden una armonía entre el mundo de lo muy grande y el de lo muy pequeño. Algunos de los más importantes son:

- ¿Continuidad o discretización? La relatividad general es una ley cuyas ecuaciones tienen forma diferencial, es decir, que lo que sucede en un punto depende de su relación con los puntos inmediatamente cercanos en el espacio y en el tiempo. Se trata de una teoría del continuo, donde podemos suponer que, por muy cerca que se encuentren dos puntos del espacio-tiempo, siempre podemos insertar otro punto entre ellos. Por el contrario, la mecánica cuántica es una teoría discreta, no continua. Un fotón de radiación tiene una energía proporcional a su frecuencia, y esa energía no puede adoptar cualquier valor. El ca-

¿TIENES UN PC? ¡PONLO A DETECTAR ONDAS GRAVITACIONALES!

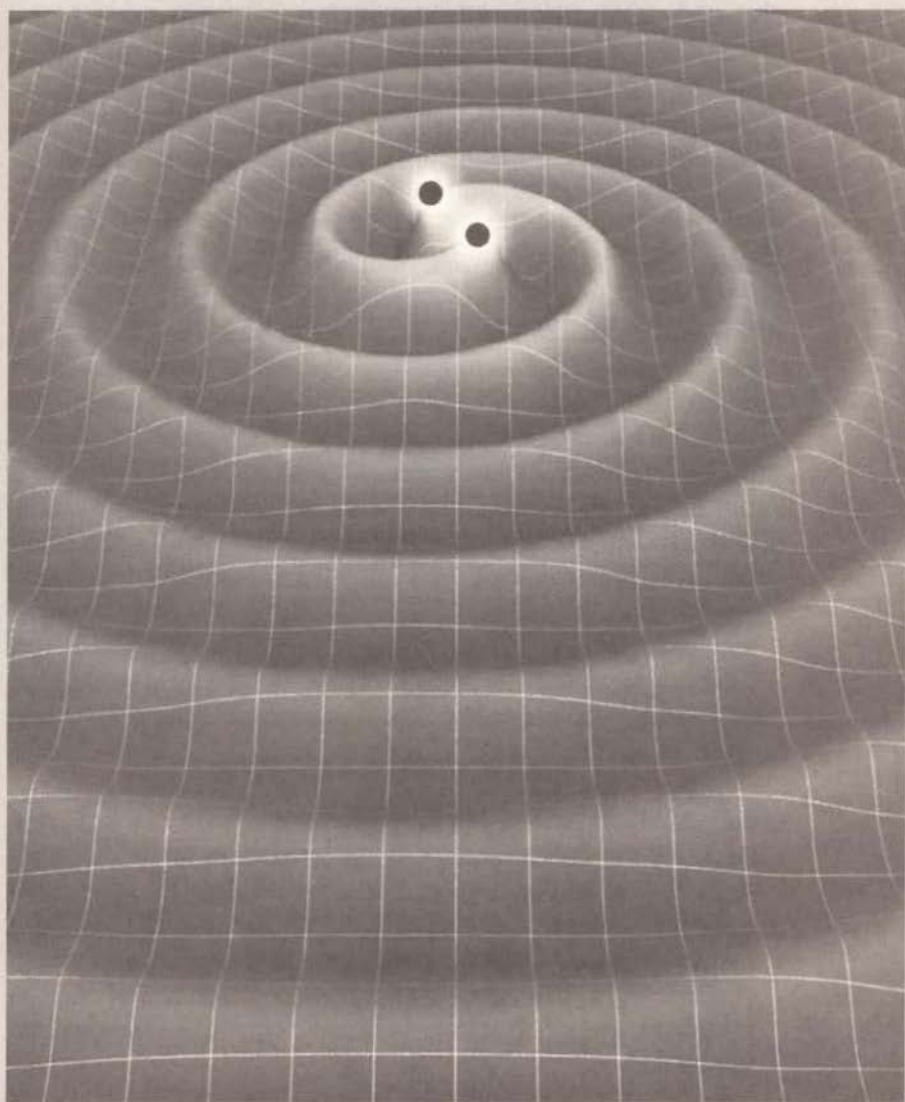
Las ondas gravitacionales, predichas por la relatividad general, son la forma con la que los cambios bruscos en los campos gravitatorios se extienden por el espacio, tal y como las partículas cargadas eléctricamente pueden producir ondas electromagnéticas. Para detectarlas, en 2002 se inició un proyecto científico internacional, el Observatorio de Interferometría Láser de Ondas gravitacionales o LIGO (por *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), que supuso nuevos retos en ingeniería y tecnología, como el de abordar y procesar toda la información recogida. Pero los superordenadores son caros y están muy solicitados y, en cambio, hay infinidad de ordenadores personales con una capacidad de cálculo muy alta que, en su mayor parte, se desperdicia. ¿Y si un montón de voluntarios donaran su tiempo de CPU de ordenador no usado? Así surgió el proyecto de computación distribuida *Einstein@home*, presentado oficialmente en 2005 coincidiendo con el centenario del descubrimiento de la teoría de la relatividad especial. Se trata de un esquema de computación distribuida y voluntaria a gran escala, con casi 400 000 usuarios participando en la tarea. Un programa que usa el tiempo durante el cual el PC de un voluntario no está siendo usado para analizar datos de interés para el LIGO.

Computación distribuida en busca de extraterrestres

Einstein@home no es el primer proyecto de computación distribuida, ni tampoco el más grande. Uno de los pioneros fue el *SETI@home*, (del programa SETI, *Search for Extraterrestrial Intelligence*), diseñado para procesar los datos contenidos en las ondas de radio que recibían ciertos radiotelescopios, con el objetivo de detectar civilizaciones extraterrestres. Ambos proyectos forman parte de una plataforma común de software abierto llamada BOINC (*Berkeley Open Infrastructure for Network Computing*). El usuario descarga un pequeño programa que aprovecha una fracción de la potencia de cálculo de su ordenador para procesar pequeños paquetes de datos y enviar los resultados a un servidor central. El proceso no influye apenas en las prestaciones del ordenador que cede su disco, lo que facilita la tarea de conseguir voluntarios, que escogen en qué proyectos participar. La plataforma BOINC se ha hecho famosa sobre todo por albergar el proyecto *SETI@home*, pero su utilidad va más allá de buscar hipotéticos alienígenas. Las opciones son muy diversas: se han llevado a cabo simulaciones en física de partículas, factorización de números primos, modelos climáticos, diseño de medicamentos, resolución de conjeturas matemáticas, modelado de proteínas...

Superordenadores para grandes retos

La colaboración de los voluntarios de *Einstein@home* ha sido vital asimismo para procesar las señales del observatorio LIGO, que cuenta con dos sedes en Estados Unidos, y también de otros sistemas de observación como el detector alemán GEO600, el radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico) y el satélite de observación de rayos gamma Fermi, en órbita desde 2008. Por el momento no se ha conseguido el objetivo: detectar ondas gravitacionales, pero el proyecto continúa trabajando a pleno rendimiento, operando, con la ayuda de los cibernautas de todo el planeta, con la potencia de cálculo equivalente a uno de los mayores superordenadores del mundo.



Representación realizada por científicos de la NASA de ondas gravitacionales producidas por dos estrellas en rápida rotación mutua.

rácter cuantizador que se impone a variables como la energía o el momento angular, se lleva mal con la naturaleza continua de la relatividad general. El propio espacio-tiempo deja de ser continuo en mecánica cuántica. El principio de indeterminación de Heisenberg fuerza a la cuantización del espacio y, como consecuencia, existe un tamaño mínimo, denominado *longitud de Planck*, por debajo del cual conceptos como espacio o longitud dejan de tener sentido.

- La reversibilidad temporal. Si observamos una grabación de un objeto en movimiento no podemos saber, en principio, si la reproducción se hace de la forma habitual o a la inversa, de final a comienzo. Eso indica que el movimiento es simétrico con relación al tiempo. Dicho de otra forma: si el tiempo comenzase a fluir de presente a pasado, las leyes de la dinámica clásica no se verían alteradas. La ley de reversibilidad temporal también rige los acontecimientos en mecánica cuántica, pero no ocurre lo mismo con la relatividad general. Un ejemplo es el agujero negro, una región del espacio con una gravedad tan intensa que nada puede escapar de su horizonte, ni siquiera la luz; lo opuesto no puede suceder si damos al botón de reproducción hacia atrás. Lo que se debate en la actualidad es si un agujero negro preserva o destruye la información que entra en su interior.
- La renormalización. Las teorías cuánticas de campos, que rigen los comportamientos de las partículas sometidas a interacciones débiles, fuertes y electromagnéticas, arrojan en ocasiones valores infinitos de las variables estudiadas. Para evitarlo, se utiliza una serie de técnicas denominadas *renormalización*. Pero todos los intentos por aplicar las mismas técnicas al campo gravitatorio fallan: la gravedad no es renormalizable.
- La ausencia de transmisores del gravitón. Todas las interacciones no gravitatorias se basan en la existencia de partículas que transmiten las fuerzas: los fotones para el electromag-

netismo, los gluones para la interacción fuerte, los bosones vectoriales intermedios para la interacción débil. Todas esas partículas han sido detectadas y sus propiedades han sido medidas. Pero existe una partícula de masa cero llamada gravitón cuya interacción con la materia se cree prácticamente nula, motivo por el cual no puede detectarse experimentalmente. Existe la posibilidad de detectar ondas gravitacionales que estarían relacionadas con los gravitones del modo similar a como las ondas electromagnéticas se asocian a los fotones. Las opciones de detección son mejores en este caso, pero de nuevo nos topamos con problemas prácticos. Hay experimentos internacionales para intentar detectar ondas gravitacionales, aún sin resultados.

Considerando que la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica tienen un carácter tan esencialmente diferente, se comprende hasta qué punto los esfuerzos de los físicos y matemáticos se han visto frustrados durante un siglo en su búsqueda de una teoría unificadora. En ese proceso se han conseguido sin duda una serie de éxitos parciales de gran importancia, pero también abundan los fracasos y las vías sin salida.

Hacia la gravedad cuántica

Desde Einstein, las mejores mentes de la ciencia han intentado encontrar una teoría que unificase todas las interacciones del universo. Las soluciones son imaginativas y osadas y han conseguido un éxito parcial, pero la naturaleza se resiste a revelar sus últimos secretos. Conocer las leyes últimas del universo sigue siendo una tarea pendiente.



Cuando se habla de unificar la mecánica cuántica y la relatividad, suele sobreentenderse que estamos hablando de la relatividad general. La teoría de la relatividad especial, considerablemente más sencilla, puede combinarse con una teoría cuántica de forma más o menos simple; lo que tampoco significa que sea nada fácil.

Poco tiempo después de que en 1926 Erwin Schrödinger formulara la célebre ecuación que describe cómo el estado cuántico de un sistema físico evoluciona con el tiempo, se comprobó que esta era incompatible con la relatividad especial de Einstein. Ese mismo año, Oskar Klein y el alemán Walter Gordon desarrollaron una versión relativista de la ecuación de Schrödinger. El resultado, llamado ecuación de Klein-Gordon, fue elegante pero incompleto porque no podía aplicarse más que a partículas con espín de valor cero y falló cuando se sometió a verificación experimental frente al átomo de hidrógeno.

Otro problema que genera la ecuación de Klein-Gordon es que predice la existencia de estados con energía negativa. Eso no es necesariamente malo, ya que lo interesante no suele ser la energía neta de un sistema, sino las variaciones de energía. La cuestión es que, si queremos estudiar un objeto en un campo gravita-

torio, podemos establecer que el nivel de energía potencial cero se halla en el quinto piso, asumiendo que los objetos por debajo de esa altura tienen energía potencial negativa. Pero la energía potencial de ese cuerpo no cambia en absoluto en caso de que lo subiéramos, por ejemplo, de la segunda planta hasta la sexta.

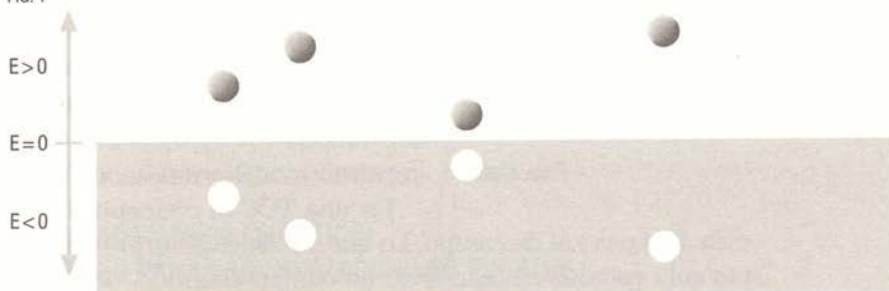
En un intento de mejorar la ecuación de Klein-Gordon, el físico inglés Paul Dirac propuso una nueva ecuación para describir el comportamiento de partículas con valor de espín $1/2$ que fuese compatible con la relatividad especial. Su propósito era aplicarla al caso del electrón, cosa que consiguió con éxito en 1930. Pero el problema de los niveles de energía negativa seguía presente, ya que, según ella, un electrón podría decaer a uno de esos niveles y no es eso lo que se observa experimentalmente. Peor aún, sin límite inferior al valor de esa energía negativa, el electrón iría decayendo a estados de energía cada vez más baja, emitiendo en el proceso una cantidad infinita de fotones.

En algunos casos, el valor negativo de una cantidad puede descartarse por carecer de significado físico. Dirac no hizo tal cosa. Aprovechó una propiedad de los fermiones (una clase de partículas que incluye los electrones), según la cual no puede haber dos de ellos con el mismo estado cuántico (objeto matemático que describe cómo es un sistema físico en un momento dado) y ocupando el mismo espacio, algo conocido como principio de exclusión de Pauli.

Imaginemos, argumentó Dirac, que el espacio está lleno de partículas que ocupan todos los estados de energía negativa. Si añadimos electrones, estos no podrán ocupar un estado de energía negativa porque lo prohíbe el principio de exclusión de Pauli, así que necesariamente deberán ocupar un estado de energía positiva (figura 1). De ese modo, el espacio vacío no está realmente vacío sino que se compone de una miríada de electrones en estados de energía negativa, algo conocido con el nombre de *mar de Dirac*.

La hipótesis de un vacío lleno de partículas puede parecer algo innecesario, pero Dirac se dio cuenta de una propiedad interesante. Si se extrae un electrón del mar de Dirac, el hueco que deja se comporta como una partícula con carga y energía positivas, ya que el conjunto electrón + hueco tiene energía neta

FIG. 1



El espacio está compuesto por multitud de electrones en estados de energía negativa (el llamado mar de Dirac). Si un electrón (círculo oscuro) recibe suficiente energía, deja un hueco (círculo blanco) que se manifiesta como una partícula. Se ha creado un par electrón-positrón.

cero. Inicialmente, Dirac creyó que ese hueco podría representar el protón, pero pronto se comprobó que un protón tiene casi dos mil veces la masa de un electrón. No parecía probable que dos partículas tan diferentes en masa tuvieran una relación de partícula y hueco.

Lejos de desanimarse, Dirac postuló en 1931 la existencia de lo que él denominó un «anti-electrón», una hipotética partícula con carga positiva y masa idéntica a la del electrón. Su propuesta fue una osadía, ya que entonces solo se conocía la existencia de dos partículas, el electrón y el protón. En 1932 llegó la confirmación: el físico norteamericano Carl Anderson descubrió una partícula con la misma masa que el electrón y carga positiva, el antielectrón, que hoy recibe el nombre de positrón. Fue el primer descubrimiento de una antipartícula. Contra todo pronóstico, Dirac tenía razón. Así fue como se planteó la primera mecánica cuántica relativista.

LA TCC: UNA TEORÍA PARA CONSTRUIR MODELOS MECANOCUÁNTICOS

El modelo del mar de Dirac, con sus infinitos niveles de energía negativa ocupados, no es elegante en sus conceptos, y tampoco sirve

Conforme pasa el tiempo, es cada vez más evidente que las normas que el matemático encuentra interesantes son las mismas por las que ha optado la naturaleza.

PAUL DIRAC

para los bosones, partículas de espín entero que no siguen el principio de exclusión de Pauli; pero abrió la puerta a un nuevo formalismo, conocido genéricamente como teoría cuántica de campos (TCC), que nos permite construir modelos mecanocuánticos.

En una TCC el concepto de partícula deja paso al de campo. Lo que consideramos partículas son tan solo estados excitados de un campo cuántico, de la misma forma que los fotones o partículas de luz son excitaciones del campo electromagnético. Las fuerzas que hay entre partículas se estudian como interacciones de esos campos.

La primera teoría cuántica de campos fue creada en relación al electromagnetismo, y recibe el nombre de electrodinámica cuántica (QED por sus siglas en inglés). Gracias a ella se pudo tratar al positrón como una partícula real, al tiempo que se eliminaba el concepto de mar de Dirac y sus engorrosos infinitos. Además, muy importante, resultó ser una teoría compatible con la relatividad especial de Einstein. Parecía que, por fin, comenzaba la senda que llevaría a la unificación de todas las fuerzas y leyes de la física.

Pero pronto se descubrió un grave problema con la QED: al calcular algunas variables aparecen valores infinitos. Un caso típico es la llamada autoenergía del electrón, que refleja la contribución energética que se produce en el mismo electrón debido a las interacciones entre la partícula y el sistema que le rodea. La solución no llegó hasta los años cincuenta gracias a un procedimiento llamado *renormalización* (de la que hemos hablado en el capítulo anterior, como una de las incompatibilidades entre las teorías de la relatividad general y la mecánica cuántica) que eliminaba el problema de los infinitos.

La renormalización se ha convertido desde entonces en una cualidad deseable para cualquier teoría cuántica de campos. Ciertamente lo fue para el caso de la QED. Los principales formuladores de esta teoría, el japonés Sin-Ichiro Tomonaga y los norteamericanos Richard Feynman y Julian Schwinger, recibieron por ella el premio Nobel de Física en 1965. Algunos cien-

tíficos no compartieron totalmente la validez matemática de la renormalización (entre ellos, el propio Feynman), pero los resultados son indiscutibles. Como ejemplo, puede citarse el cálculo del llamado factor g , donde la QED arroja valores que coinciden con los mejores resultados experimentales a niveles de precisión de una parte entre un billón.

LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA: UNA TEORÍA PARA LAS INTERACCIONES FUERTES

Tras el éxito de la electrodinámica cuántica, el siguiente paso fue buscar la formulación de una teoría cuántica de campos similar para explicar la fuerza nuclear, con el objetivo de poder describir la proliferación de tantas nuevas partículas.

Cabe recordar que, hasta los años treinta, solo se conocían unas pocas partículas elementales: electrón, protón, neutrón, positrón, muon. Pero, una vez acabada la Segunda Guerra Mundial, los esfuerzos para entender el mundo subnuclear se multiplicaron y el resultado fue la aparición de todo un zoo de partículas: bariones delta, lambda, sigma, xi, omega, mesones pi, rho, eta, fi, psi, ípsilon, theta... Los científicos agotaron el alfabeto griego y las partículas seguían apareciendo por doquier como si se tratara de una plaga.

Era necesario introducir un cambio de paradigma, ya que admitir una cantidad tan grande de nuevas partículas elementales sugería un universo excesivamente complejo. Era el momento de simplificar y, con ese objeto, se desarrolló el *modelo de quarks*, según el cual las partículas llamadas hadrones se componen de cierto número de subpartículas elementales denominadas quarks. Los hadrones compuestos por dos quarks se llaman mesones, y los que tienen tres reciben el nombre de bariones.

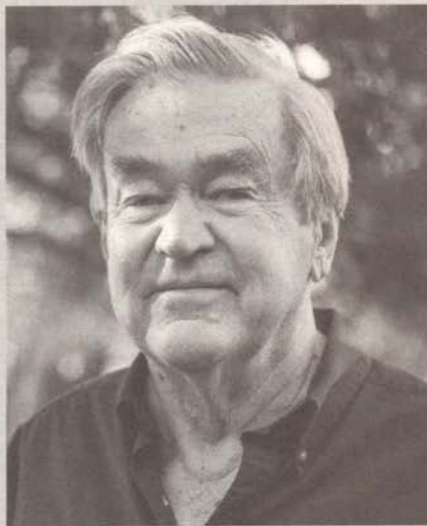
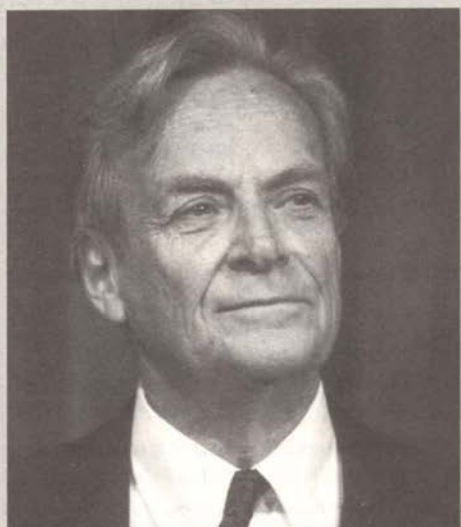
Las interacciones entre quarks se llevan a cabo gracias a partículas portadoras de fuerza que se denominan gluones. Estos son los responsables de que los quarks se mantengan unidos dentro de los hadrones (figura 2) y también son el mecanismo que explica las interacciones entre hadrones, es decir, la fuerza nuclear fuerte.

QUARKS: REQUESONES DE COLORES UNIDOS CON PEGAMENTO

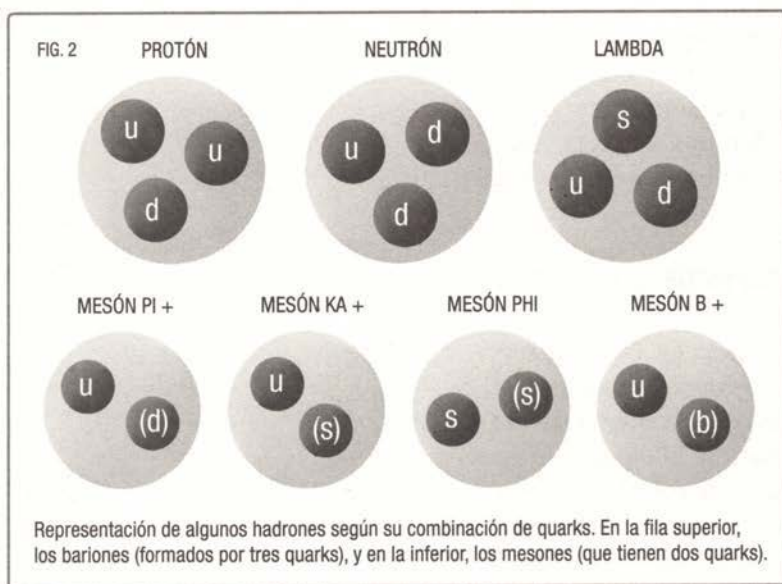
Aunque los físicos de partículas se toman su trabajo en serio, ello no impide que se diviertan de vez en cuando. Nada más ilustrativo que el ejemplo de la nomenclatura que rodea a los quarks. Cuando fueron propuestos por primera vez, en lugar de utilizar nombres con raíces griega o latina como era habitual en este campo, se limitaron a bautizarlos con términos sencillos. Los dos primeros (en orden creciente de masa) recibieron el nombre de «arriba» (*up*) y «abajo» (*down*), en alusión a la dirección de su propiedad de espín. El tercero, inicialmente denominado «lateral» (*sideways*), fue propuesto para explicar la existencia de la partícula llamada mesón K; alguien notó que esta partícula tenía una vida media extrañamente larga y el quark pasó a llamarse «extraño» (*strange*). Igual que los quarks arriba y abajo hacían una pareja, un cuarto quark podría formar una pareja con el quark extraño. Los físicos estadounidenses Sheldon Glashow y James Bjorken quedaron tan maravillados por la simetría que este nuevo quark aportó al mundo subnuclear que decidieron llamarlo quark «encanto» (*charm*). Los descubrimientos posteriores hicieron necesaria una tercera familia de quarks. Se propusieron los nombres de «belleza» y «verdad» (*beauty/truth*), quizá con la esperanza de hacer nuevos juegos de palabras como «buscamos la verdad desnuda» (*bare truth*). Aquello fue demasiado incluso para los físicos de partículas, y se optó por llamarlos «cima» (*top*) y «fondo» (*bottom*); aunque los amantes del chiste fácil podían seguir argumentando que buscaban el «fondo desnudo» (*bare bottom*), en el entendido de que la palabra *bottom* también puede traducirse como «culo».

Seis sabores distintos

Los quarks, por tanto, aparecen en seis formas: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *top*, *bottom* (siguiendo la terminología estándar en inglés). Sería normal hablar de seis especies, clases o categorías, pero los físicos de partículas tienen un nuevo término para clasificarlos: sabores. Se habla del quark con «sabor» *up* o «sabor» *charm*; por supuesto, esta acepción del término no tiene absolutamente ninguna relación con el significado al que estamos habituados. Los quarks tienen una propiedad cuántica similar a la carga eléctrica. Científicos más serios hubieran bautizado esa nueva propiedad como «carga quark» o «subcarga», pero el estadounidense Murray Gell-Mann, pionero de la física de los quarks, tenía un nombre preparado: la llamó «color». Ahora los quarks tienen «color» rojo, verde o azul, sin que, de nuevo, haya ninguna relación con los colores que vemos con nuestros ojos. Los quarks necesitaban partículas que transmitiesen la interacción entre ellas. El nombre escogido fue el de gluon, término en apariencia serio y elegante pero que está basado en la palabra inglesa *glue* (pegamento). Finalmente está el propio nombre de las partículas. En un principio Richard Feynman las llamó «partones», pero finalmente la propuesta de Gell-Mann prosperó y acabaron llamándose *quarks*. El nombre proviene de un poema de la novela de James Joyce *Finnegan's Wake* en el que aparece este término. No está claro de dónde lo sacó Joyce ni cuál es su auténtico significado. Sin embargo, puede traducirse del alemán como «requesón» o «cuajada». En definitiva, usando la terminología de Murray Gell-Mann y sus colegas, la naturaleza y todo lo que nos rodea está compuesta por diminutos requesones coloreados de seis sabores distintos, unidos entre sí con pegamento.



Richard Feynman (arriba izquierda), primer físico que buscó una denominación para el quark, junto a él, a la derecha, Murray Gell-Mann, quien finalmente lo bautizó; abajo, Sheldon Glashow (izquierda) y James Bjorken (derecha), los primeros físicos en hablar de «encanto» refiriéndose a una clase de quarks.



Lo que significa que una teoría cuántica de campos para la interacción fuerte debe tomar en consideración los quarks y los gluones.

Cuando se formuló la teoría de quarks, se constató que la teoría cuántica asociada, debido a su propia estructura, había de ser por fuerza más compleja. La QED debe considerar la carga eléctrica, que tiene tan solo dos valores (positivo y negativo), en tanto que la propiedad análoga de los quarks, llamada carga de color, tiene tres posibles valores. La partícula que transmite la fuerza en un campo electromagnético es el fotón, carente de carga eléctrica; en cambio, la correspondiente a la interacción fuerte, el gluon, viene en ocho tipos distintos y todos ellos tienen carga de color, lo que significa que los gluones pueden interaccionar entre ellos. Para complicar aún más el panorama, existen seis tipos distintos de quarks y, por supuesto, para cada quark existe también su antiquark.

Todo ello, unido al hecho de que estas fuerzas son de alcance extremadamente corto, hizo mucho más difícil obtener una teoría cuántica de campos para las interacciones fuertes. Pero al final se consiguió, y el resultado recibe el nombre de cromodinámica cuántica (QCD). Para trabajar con ella se ha desarrollado

un conjunto de métodos aproximados de mayor o menor éxito. Se trata de una teoría difícil de manejar pero que funciona a satisfacción de los físicos de partículas. Podemos, por tanto, tachar una de las tareas incluidas en la lista de asuntos necesarios para crear una teoría del todo.

UN MODELO ESTÁNDAR PARA CONSTRUIRLO CASI TODO

Tras la QCD, los esfuerzos se dirigieron hacia la unificación de las fuerzas fundamentales. Hasta los años setenta se consideraba que existían cuatro fuerzas fundamentales distintas: la gravitación, el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. Fue entonces cuando Abdus Salam, Sheldon Glashow y Steven Weinberg desarrollaron la teoría electrodébil para unificar las fuerzas electromagnética y nuclear débil. Pero si, aparentemente, se trata de fuerzas muy distintas, tanto en intensidad como en alcance...¿cómo es posible que sean consideradas como un solo tipo de fuerzas?

La respuesta recibe el nombre de *ruptura espontánea de simetría*, un concepto mediante el cual pueden describirse dos tipos de fuerzas diferentes. Para entender el concepto de ruptura de simetría, imaginemos un bloque de hierro en cuyo interior los momentos magnéticos de los átomos de hierro apuntan en direcciones aleatorias, por lo que no hay imantación en el hierro. Sin embargo, cuando se introduce un factor externo, en este caso un campo magnético, las partículas se realinean y el bloque de hierro queda imantado: se ha roto la simetría (figura 3).

De modo análogo, algo que de momento llamaremos *X* produce una ruptura de simetría cuando la energía del sistema es lo bastante baja, haciendo que la interacción electrodébil se divida en las dos fuerzas, la electromagnética y la nuclear débil, que ya conocemos. Si eso es cierto, provocar la colisión de partículas a energías lo bastante altas podría poner de manifiesto la unificación de ambas fuerzas. Eso es justo lo que se consiguió a comienzos de los años ochenta en el complejo de aceleradores de partículas del CERN, situado en Ginebra, fruto de un esfuer-

zo internacional conjunto. A comienzos de los años ochenta, la ruptura de la simetría electrodébil pudo ser verificada a nivel experimental.

En cuanto al mecanismo productor de la ruptura, ese «llamado *X*» es lo que hoy se denomina campo de Higgs. De existir, como todo campo implica la existencia de partículas, había de poder detectarse una partícula asociada llamada bosón de Higgs, el cual, en efecto, fue descubierto en el gran colisionador de hadrones del CERN en el año 2013.

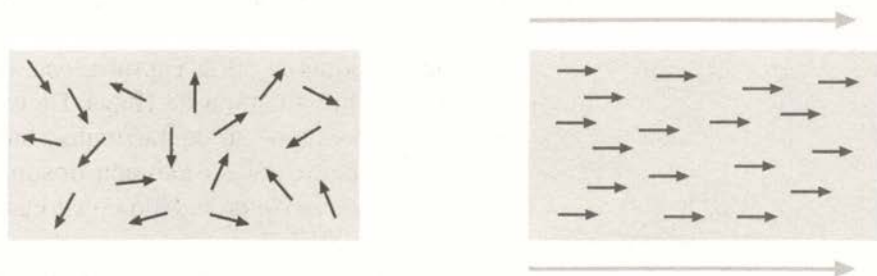
Por tanto, tenemos, en suma, cuatro grandes teorías en física que unifican las interacciones entre partículas y campos:

- La electrodinámica cuántica (QED) para el electromagnetismo.
- La cromodinámica cuántica (QCD) para la fuerza nuclear fuerte.
- La teoría electrodébil para la unificación del electromagnetismo y la fuerza nuclear débil.
- El modelo de quarks para la física de partículas.

Cuando combinamos todas estas teorías y las ponemos en el mismo saco, obtenemos la descripción más completa y detallada de nuestro mundo hasta la fecha: el denominado *modelo estándar* (figura 4), según el cual los bloques fundamentales para construirlo todo (o casi) son los siguientes:





- Seis quarks para formar partículas compuestas como mesones y hadrones.
- Seis partículas elementales llamadas globalmente leptones: electrón, muon, partícula tau y tres tipos de neutrinos (electrónico, muónico y tau).
- Un fotón para transmitir las fuerzas electromagnéticas.

FIG. 3



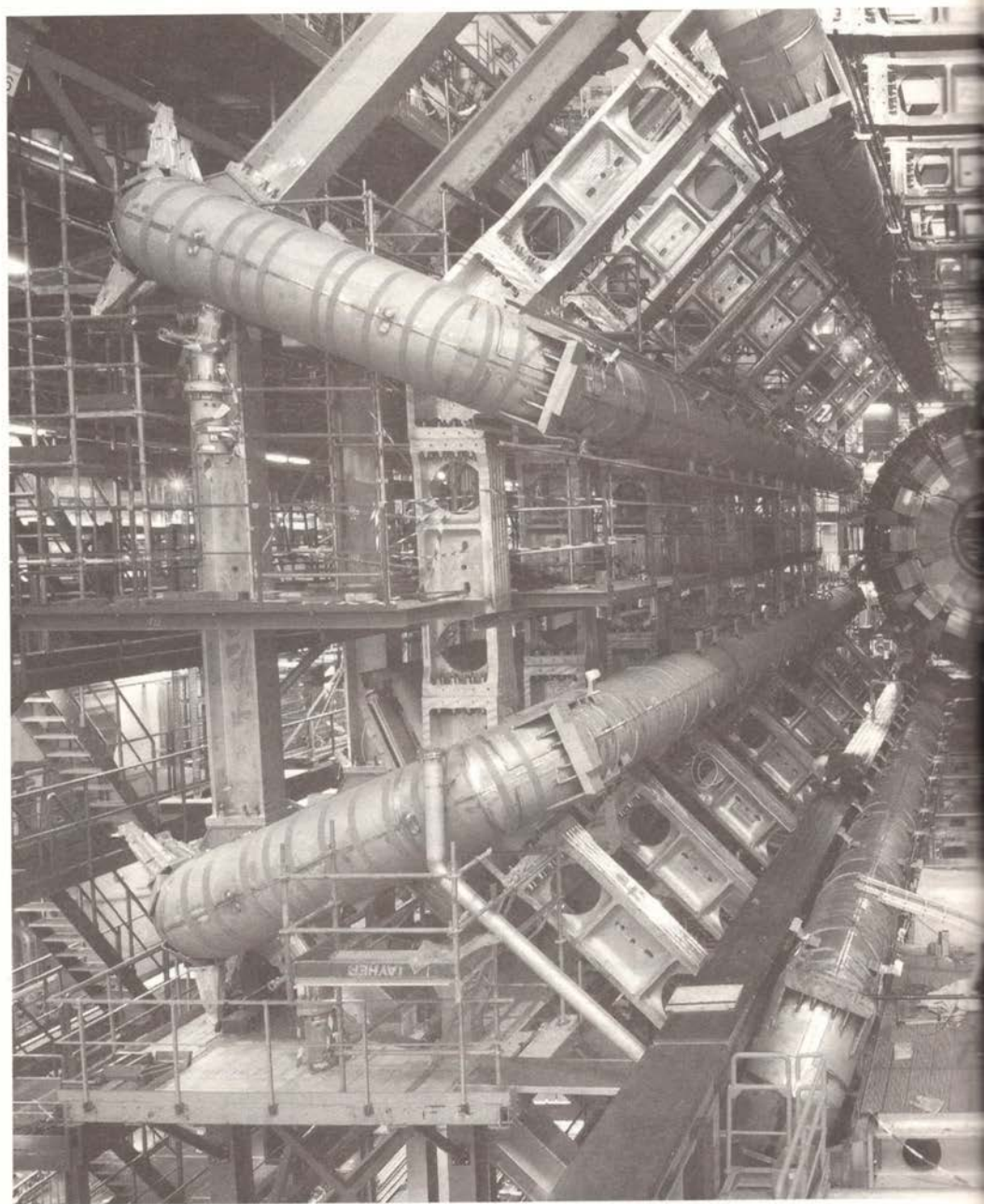
Alineación de los momentos magnéticos de un bloque de hierro en ausencia (izquierda) y en presencia (derecha) de un campo magnético externo.

FIG. 4

QUARKS						
	Arriba	Abajo	Encanto	Extraño	Fondo	Cima
LEPTONES						
	Electrón	Neutrino electrónico	Muon	Neutrino muónico	Tau	Neutrino tauónico
BOSONES						
	Fotón	Bosones intermedios	Gluon	Higgs		

Las diecisiete partículas elementales que constituyen el modelo estándar.

- Dos tipos de bosones intermedios para transmitir las fuerzas nucleares débiles.
- Un gluon para transmitir las fuerzas nucleares débiles.
- Un bosón de Higgs.



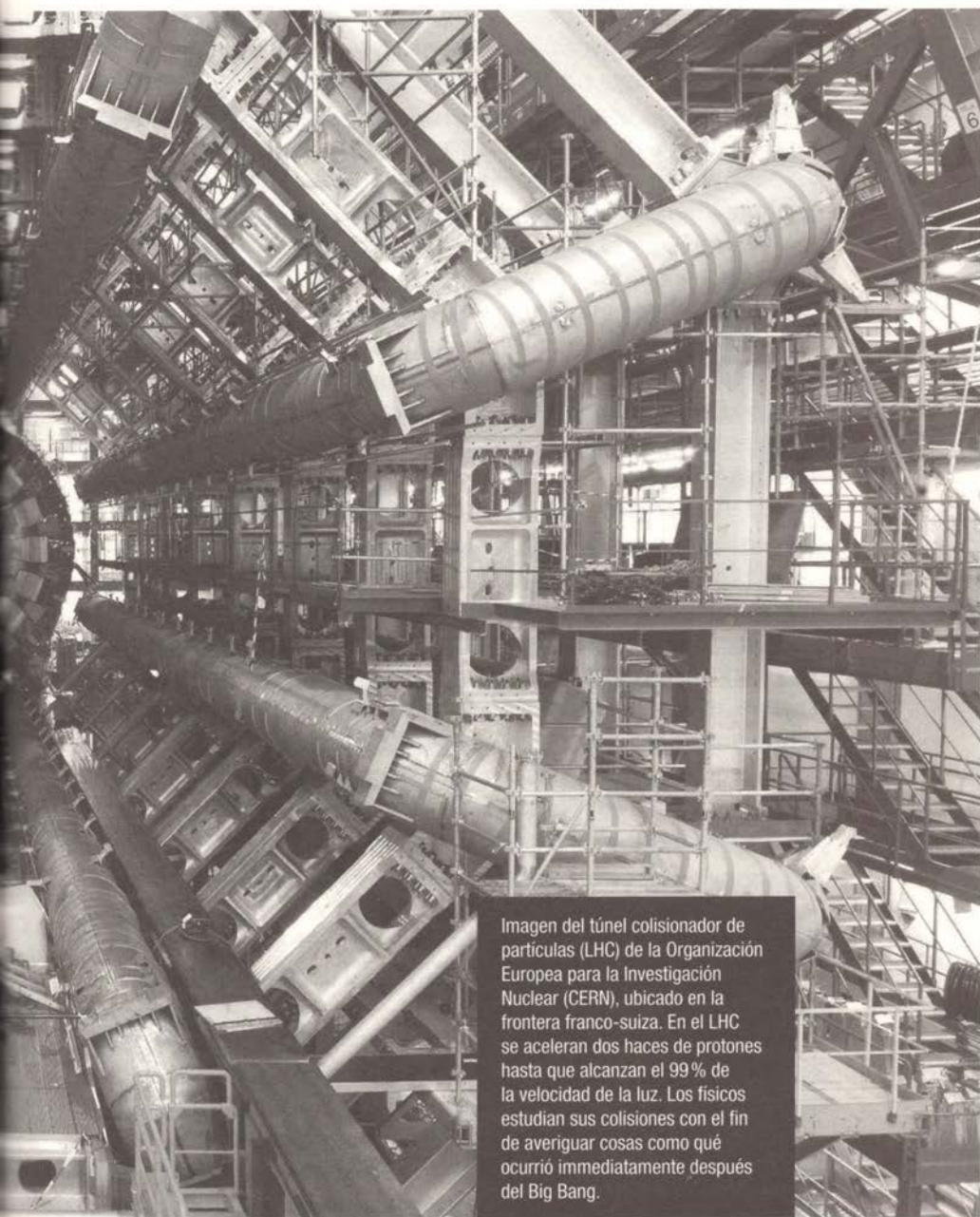


Imagen del túnel colisionador de partículas (LHC) de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), ubicado en la frontera franco-suiza. En el LHC se aceleran dos haces de protones hasta que alcanzan el 99 % de la velocidad de la luz. Los físicos estudian sus colisiones con el fin de averiguar cosas como qué ocurrió inmediatamente después del Big Bang.

Total: diecisiete, aunque, estrictamente hablando, habría que considerar algunos más. Los bosones intermedios son realmente tres (uno con carga positiva, otro con carga negativa y un tercero neutro). Los quarks y leptones tienen sus propias antipartículas. Cada quark tiene tres tipos de carga, así que deberíamos triplicar el número de quarks (y de antiquarks); y también hay que considerar ocho valores distintos para la carga de los gluones. En cualquier caso, podemos considerarlas variantes de las 17 partículas fundamentales.

El modelo estándar es, para los físicos de partículas, como el viejo coche familiar: fiable, reconfortante, te sientes seguro en él y sabes que te llevará a muchos lugares de interés. Tiene la ventaja de describir casi todas las partículas e interacciones concebibles en condiciones compatibles con la relatividad especial de Einstein, pero dista mucho de ser una teoría homogénea. En lugar de un elegante tren de alta velocidad tenemos una amalgama de vagones, todos distintos y pintados de diferentes colores.

Además, existen cuestiones pendientes que el modelo no permite explicar, como el problema de su dependencia de un excesivo número de parámetros o comprender por qué el electrón o el quark encanto tienen justamente esos valores de masa y no otros. Encima, está el hecho de que en el universo hay más materia que antimateria, algo que, según este modelo, no debería suceder.

Es necesario dar un paso más allá, y cualquier dirección que tomemos resulta especulativa y arriesgada. ¿Qué vehículo sustituirá a nuestro fiable pero viejo utilitario?

MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR: LAS TEORÍAS DE GRAN UNIFICACIÓN

Con el objetivo de solventar los problemas del modelo estándar se desarrollaron modelos teóricos más homogéneos y menos caprichosos denominados teorías de gran unificación (GUT, del inglés *Grand Unified Theories*). El nombre no es totalmente inocente. *Guts* significa tripas, pero en inglés norteamericano se le asigna también el significado de tener coraje o echarle agallas a

algo. Cualquier intento de ir más allá del modelo estándar significaba entrar en territorio desconocido, y para intentarlo ciertamente hay que echarle... *guts*.

Como característica común, cualquier teoría GUT que se pre-cie debe considerar las fuerzas electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil como aspectos de una misma interacción. A energías bajas, la GUT muestra tres tipos aparentemente distintos de fuerzas, y es por eso que vemos tantas diferencias entre ellas; pero cuando la energía es lo bastante alta y supera la llamada energía de unificación, las tres fuerzas se convierten en una sola.

La energía de unificación predicha por la mayoría de teorías GUT tiene un valor similar a la energía cinética de una furgoneta al máximo de su velocidad legal permitida, algo habitual en la escala humana pero enorme para una partícula subnuclear. Los aceleradores de partículas más potentes del mundo ponen en juego una energía un billón de veces más débil, motivo por el cual la confirmación o refutación experimental de las teorías GUT tiene un grave problema. Existe, sin embargo, la posibilidad de evaluar la validez de las GUT mediante dos predicciones: la existencia de monopolos magnéticos y la desintegración del protón. Los monopolos magnéticos son el equivalente de las cargas eléctricas aisladas y, hasta la fecha, ninguno ha sido detectado. En cuanto al protón, las teorías GUT indican que se trata de una partícula longeva pero no estable, con una vida media de unos 10^{30} años. Pero diversas observaciones han arrojado un valor de la vida media del protón al menos mil veces superior, lo que parece refutar la validez de las GUT habitualmente usadas. Aunque existen teorías GUT en las que el protón es más longevo, su mayor complejidad y la ausencia de verificación experimental contribuyó a que los buscadores de la teoría del todo se planteasen mirar en otras direcciones.

Y es que, aun cuando se encontrase una teoría GUT adecuada que pudiese resolver las discrepancias con los resultados experimentales, quedaría un escollo: falta solucionar el tema de la gravedad. Nuevamente observamos cómo la interacción gravitatoria queda al margen, y eso no es un paso en la dirección correcta. Es

ESPERANDO LA DESINTEGRACIÓN DE UN PROTÓN

Según el modelo estándar, el protón es una partícula estable. Algunas teorías de gran unificación (las denominadas GUT) afirman, por el contrario, que el protón decae cuando alcanza una vida media de al menos 10^{29} años. Eso proporciona a los científicos una forma de comprobar o refutar experimentalmente las teorías GUT. Sin embargo, no pueden sentarse a esperar a que un protón se desintegre, porque su vida media, en caso de no ser estable, supera con mucho la edad del universo, estimada en algo más de 10^{10} años. Existe una forma más práctica de poder comprobar si un protón es estable: examinar a muchos de ellos a la vez. Juntemos 10^{29} protones (por ejemplo, llenando una piscina con media tonelada de agua), observémoslos cuidadosamente y esperemos a que alguno de ellos se desintegre; hay que tener en cuenta que los rayos cósmicos pueden dar señales falsas de desintegración, de modo que habrá que esconder nuestro laboratorio en una mina situada a gran profundidad.

Mucha agua y mucha paciencia

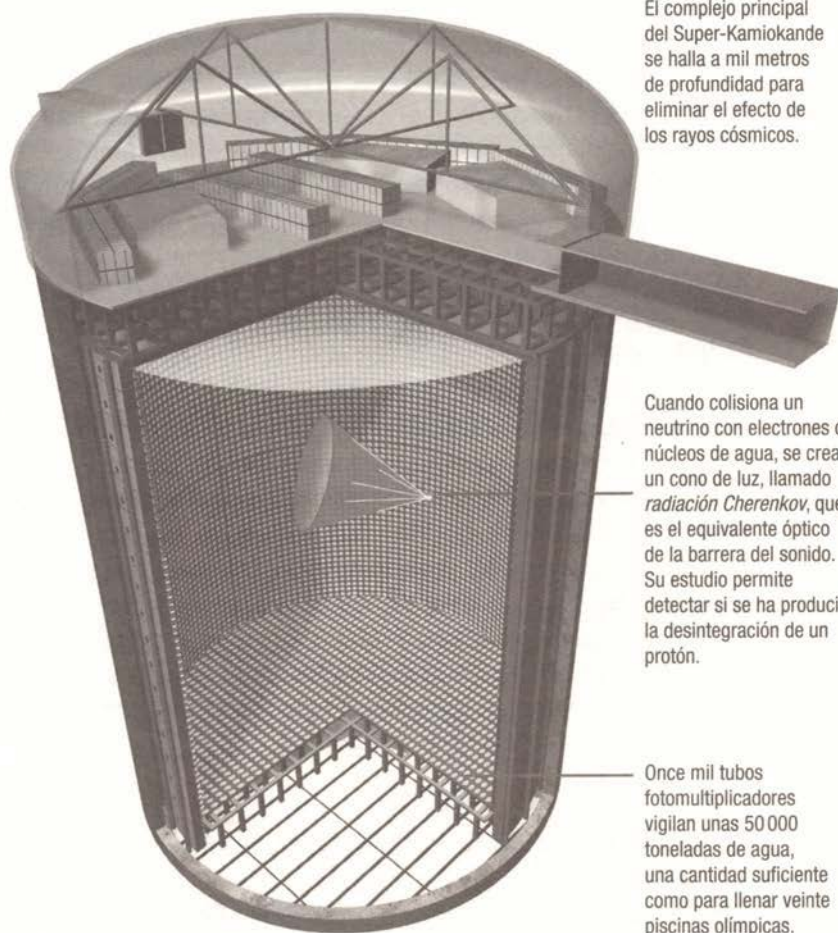
Se han llevado a cabo diversos experimentos al respecto. En uno de ellos, realizado en una mina en Ohio (EE UU), se usaron ocho mil toneladas de agua como material para observar protones, pero no se detectó ninguna desintegración. Eso no significa necesariamente que el protón sea eterno, sino que su vida media es tan alta que la probabilidad de detectar un solo fenómeno de desintegración es muy baja. En ese caso, se pudo establecer una cota inferior a la vida media del protón de 10^{31} años.

El intento del Super-K japonés

Para aumentar las probabilidades, el observatorio Super-Kamiokande de Japón (también conocido como Super-K) examinó el comportamiento de una masa de 50 000 toneladas de agua ultra pura, que contenía unos $5 \cdot 10^{34}$ protones. Tras un largo periodo de análisis, se concluyó que la vida media del protón supera los 10^{34} años. Algunas de las teorías de gran unificación que predicen protones menos longevos han tenido que ser descartadas; otras teorías predicen protones con una vida media superior a 10^{36} años y son, por tanto, compatibles con los resultados experimentales obtenidos hasta la fecha.

La LAGUNA europea

Para aumentar experimentalmente el valor mínimo de la vida media del protón es necesario un esfuerzo de colaboración internacional. Como el que desarrolla el consorcio paneuropeo con participación española denominado LAGUNA (*Large Apparatus studying Grand Unification and Neutrino Astrophysics*), en el que se intentará experimentar con masas de agua muy superiores a las del observatorio Super-Kamiokande (hasta un millón de toneladas, según las propuestas más optimistas). En paralelo, otros proyectos similares se están ultimando en Estados Unidos y Japón. El objetivo final es comprobar o refutar las teorías de gran unificación. El procedimiento es siempre el mismo: reunir una enorme cantidad de protones en un agujero situado a gran profundidad, apagar la luz... y esperar.



El complejo principal del Super-Kamiokande se halla a mil metros de profundidad para eliminar el efecto de los rayos cósmicos.

Cuando colisiona un neutrino con electrones o núcleos de agua, se crea un cono de luz, llamado *radiación Cherenkov*, que es el equivalente óptico de la barrera del sonido. Su estudio permite detectar si se ha producido la desintegración de un protón.

Once mil tubos fotomultiplicadores vigilan unas 50 000 toneladas de agua, una cantidad suficiente como para llenar veinte piscinas olímpicas.

Oculto en el corazón de una montaña en el centro de Japón, el Kamioka Nucleon Decay Experiment busca las señales ópticas que indiquen la desintegración de un protón. Los datos del experimento Kamioka han permitido descartar algunas teorías de gran unificación.

necesario crear una teoría cuántica de campos aplicada a la gravedad, algo que podríamos llamar gravedad cuántica.

El mecanismo sería similar al llevado a cabo para otras teorías como la QED o la QCD, y pasaría por postular la existencia de una partícula portadora de fuerza, tentativamente llamada gravitón. Como en el caso del fotón, el gravitón debería tener masa cero, algo relacionado con el hecho de que las interacciones gravitatorias y electromagnéticas tienen un alcance infinito.

Cuando se intenta visualizar la gravedad como un campo de gravitones, las cantidades observables salen infinitas; pero, al contrario que en el caso de la QED, la gravedad cuántica no es renormalizable y los infinitos no desaparecen. En el frente experimental las cosas no van mejor, ya que el gravitón, de existir, interaccionaría con la materia tan débilmente que ningún aparato concebible ahora sería capaz de detectarlo.

La dificultad fundamental es de alcance más profundo. No parece que haya motivo para que la gravedad no pueda ser tratada como las demás interacciones descritas por la teoría cuántica pero, según Einstein, la gravedad y la masa son las responsables de la curvatura del espacio-tiempo. El espacio, considerado como un escenario pasivo en las teorías cuánticas, tiene en la relatividad un papel activo y muy dinámico. Incorporar la gravedad en el modelo estándar, o incluso convertir la gravedad en una teoría de campos, significaría en esencia unificar la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad.

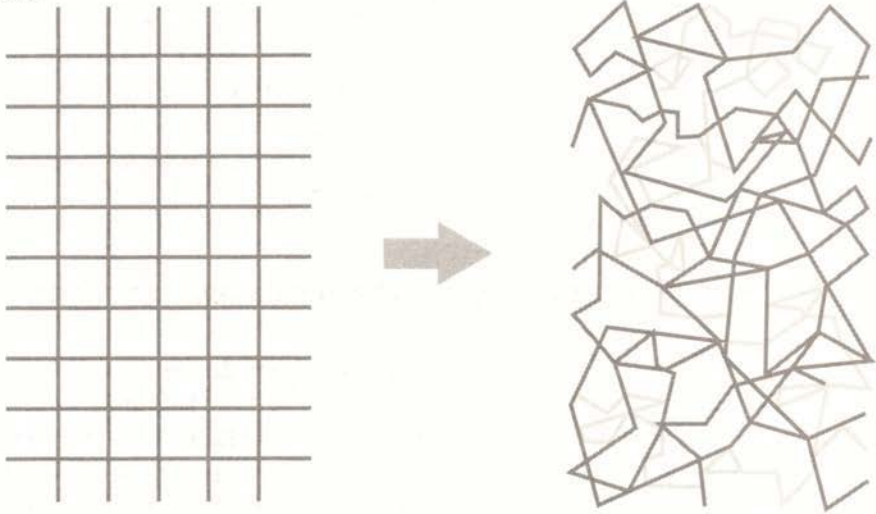
LA TEORÍA CUÁNTICA DE BUCLES, ¿UNA TEORÍA DEL TODO?

Una teoría de campos válida para la gravedad es una de las metas más ambiciosas en las teorías modernas. De entre todas las que se han propuesto destacan dos en particular. La primera de ellas, que recibe el nombre de teoría cuántica de bucles (LQT por sus siglas en inglés, *Loop Quantum Theory*), parte de una visión granular del espacio. En lugar de la visión einsteniana basada en un espacio-tiempo continuo, la LQT se basa en la idea de que el espacio tiene escalas mínimas de tamaño.

La idea fundamental de la LQT es olvidar la idea de que el espacio es un escenario donde se desarrollan las teorías físicas, y reformular la teoría cuántica de campos de tal forma que no necesite de un espacio en el que «actuar». El espacio deja paso a un concepto que sus fundadores llaman «red de espines» (figura 5), una suerte de tejido formado por bucles que, a distancias muy cortas, forman una espuma inestable donde el espacio continuo deja de existir. De este modo, el propio espacio queda cuantizado al tamaño de la longitud de Planck, por debajo de la cual el propio espacio deja de ser continuo.

La teoría cuántica de bucles es una idea surgida de un trabajo del físico indio Abhay Ashtekar, que reformulaba las ecuaciones de la relatividad general de Einstein. Sus nuevas ecuaciones fueron usadas, entre otros, por el italiano Carlo Rovelli y por el norteamericano Lee Smolin, para crear una teoría cuántica de la gravedad a partir del concepto de redes de espín formulado por el británico Roger Penrose.

FIG. 5



Una rejilla uniforme representa puntos en el espacio (izquierda). La LQT la sustituye por la llamada red de espines que representa estados cuánticos (derecha).

La verificación experimental de la teoría cuántica de bucles es muy difícil, pero al menos ha conseguido explicar una conjetura relacionada con la entropía de los agujeros negros. Cuando una estrella con suficiente masa agota su combustible nuclear, colapsa en una región del espacio infinitamente pequeña (en teoría, de tamaño nulo) llamada singularidad. Alrededor, se puede definir una superficie matemática llamada «horizonte de sucesos». Cualquier objeto que cruce ese horizonte sufrirá fuerzas gravitatorias tan intensas que nunca podrá volver a salir al espacio exterior. El resultado es lo que conocemos como un agujero negro.

Eso plantea una incompatibilidad con las leyes de la termodinámica. La segunda ley dicta que la entropía, que podemos considerar como una medida del desorden, tiende a aumentar o, como mucho, a permanecer constante. Si un objeto con alto contenido entrópico cae en un agujero negro, se pierde a todos los efectos de nuestro universo. En cierto modo, un agujero negro sería el basurero definitivo, capaz de tragárselo todo sin soltar ningún residuo, ni tan siquiera información.

Para que la segunda ley de la termodinámica siga cumpliéndose, hay que asignar un valor de la entropía al propio agujero negro. Pero ¿cómo hacerlo, si cualquier información relativa al interior del horizonte de sucesos está vedada a los observadores externos?

Puesto que el radio del horizonte de sucesos depende de la masa del agujero negro, y dado que este solamente puede absorber materia y no devolverla al espacio, dicho radio tiende a aumentar. Este hecho fue aprovechado en 1972 por el mexicano Jacob Bekenstein, quien propuso que la entropía de un agujero negro es una cantidad proporcional al área del horizonte de sucesos. El británico Stephen Hawking, en su libro *Historia del Tiempo*, reconoció posteriormente que la propuesta de Bekenstein le irritó porque aplicaba los conceptos termodinámicos de forma demasiado literal; a pesar de ello, en 1974 Hawking consiguió demostrar que, en efecto, puede definirse un valor de la entropía para un agujero negro proporcional a la superficie del horizonte.

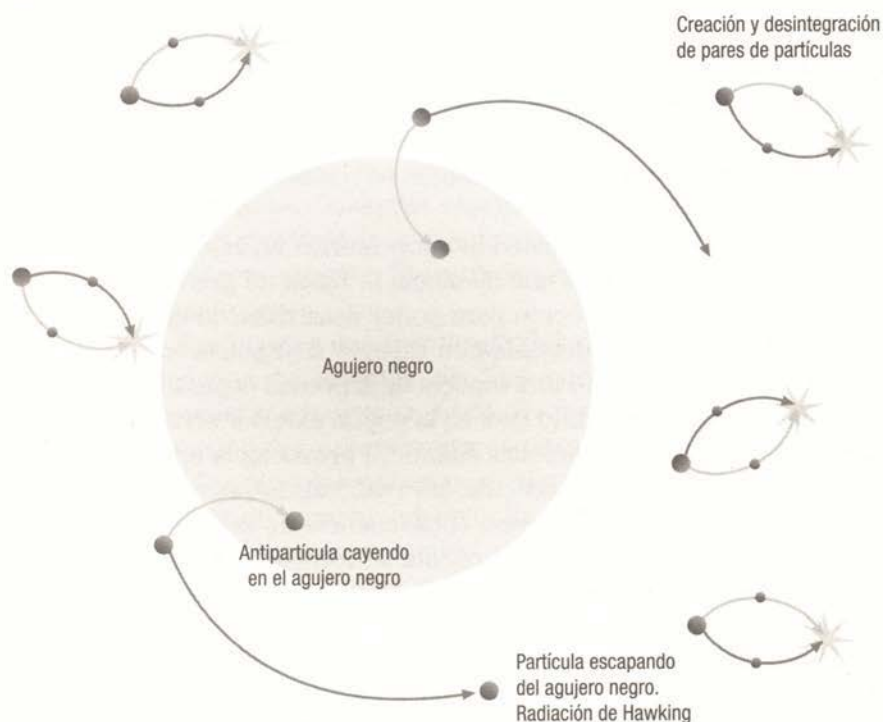
El motivo de la irritación de Hawking fue que, en apariencia, la validez de la segunda ley de la termodinámica se hacía a expensas de la primera. El concepto de entropía implica el de temperatura, y todo cuerpo a temperatura no nula emite energía en forma de radiación térmica. ¿Cómo puede emitir nada un agujero negro? Según la teoría de la relatividad general no puede, pero la situación puede ser diferente si también se toman en cuenta los efectos mecanocuánticos.

Aunque los efectos de la relatividad son fuertes en las cercanías de un agujero negro, a una distancia lo bastante grande son suficientemente débiles como para poder desarrollar la llamada *teoría cuántica de la gravedad en espacio-tiempo curvo*, que puede considerarse como una especie de gravedad cuántica aproximada. Hawking descubrió que, en la región exterior al horizonte de sucesos, las fluctuaciones cuánticas provocan la aparición de pares partícula-antipartícula. En realidad, eso sucede en cualquier lugar del espacio como consecuencia de la teoría cuántica: una partícula y una antipartícula se forman espontáneamente durante un brevísimo intervalo de tiempo antes de volver a aniquilarse y desaparecer.

La novedad es que, si el par de partículas se forma junto al horizonte de sucesos, una de ellas puede caer en el agujero negro mientras la otra escapa. El proceso requiere de una cantidad de energía que se obtiene del campo gravitatorio del propio agujero negro. De esa forma, un observador externo mide un flujo de partículas saliente del agujero mientras que la masa de este va disminuyendo. Las partículas que se alejan del agujero negro pueden considerarse como radiación térmica que abandona un cuerpo caracterizado por una temperatura no nula. A esa emisión se la conoce con el nombre de *radiación de Hawking* (figura 6).

Los resultados obtenidos mediante la teoría cuántica de bucles permiten deducir la ecuación que relaciona la entropía con la superficie del horizonte de sucesos, lo que se considera un éxito. Recientes avances realizados por un grupo de la Universidad Estatal de Luisiana, dirigido por el uruguayo Jorge Pullin, sugieren que, en contra de lo supuesto hasta ahora, el centro de

FIG. 6



El espacio cuántico está lleno de partículas que se crean y aniquilan a pares. Si uno de esos pares se crea en las cercanías de un agujero negro, es decir, en el límite del horizonte de sucesos, una partícula puede caer y la otra escaparse. Para un observador externo, es como si el agujero negro emitiese energía.

un agujero negro no es un punto singular de gravedad infinita, sino que podría ser una región de gravedad reducida que permita el paso a otro lugar del universo, o incluso a otro universo, sin duda el sueño de todos los fans de la ciencia-ficción. También podría resolver la llamada *paradoja de la información*, según la cual una caída en un agujero negro provocaría la pérdida de información asociada al sistema que cae. Si un agujero negro es un portal a otra parte del universo, la información sería transferida a ese otro lugar.

Las consecuencias de la teoría cuántica de bucles tienen asimismo implicaciones cosmológicas. La teoría de la gran explosión o Big Bang, que supuestamente creó el universo a partir de una singularidad, sería sustituida por un «gran rebote» según el cual nuestro universo se formó a partir de los restos de un universo anterior que fue estrujado hasta un minúsculo volumen por las fuerzas gravitatorias.

Eso podría acabar con las discusiones filosóficas sobre por qué todo comenzó en un momento determinado y en un lugar concreto. La respuesta sería que, realmente, no comenzó allí y entonces, sino que nuestro universo procede de otro universo anterior. La eterna pregunta «¿por qué hay algo en lugar de nada?» se respondería diciendo que hay algo porque antes también había algo; y puesto que no tenemos forma de acceder a información alguna sobre ese otro algo, la discusión filosófica acaba aquí. Y ahora.

ENREDADOS EN LA TEORÍA DE CUERDAS

La teoría cuántica de bucles es, en cierto modo, una recién llegada en el panorama de la unificación de las fuerzas, pero se ha revelado como una digna competidora de la teoría de cuerdas, la otra gran vía potencial hacia una teoría cuántica de la gravedad.

El lector recordará cómo Gunnar Nordström primero, y el dúo Kaluza-Klein después, propusieron la existencia de una quinta dimensión además de las cuatro habituales (tres de espacio y una de tiempo) en un intento de unificar la relatividad y el electromagnetismo. El esquema de Kaluza y Klein, que consideraba una dimensión compactificada (o «enrollada») y en cierto modo independiente de las otras, resultó particularmente atractivo.

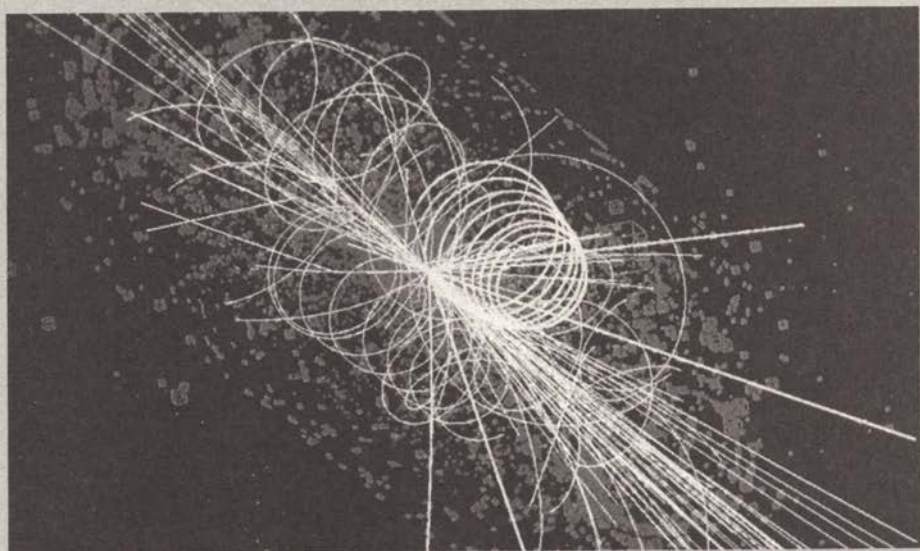
Treinta años después, los físicos se imaginaban todo tipo de hipótesis para intentar explicar el porqué de la gran cantidad de partículas elementales que encontraban los colisionadores de partículas. Una de ellas es la *teoría de cuerdas*. Según esta concepción, la materia del universo se compone de minúsculas cuerdas;

LAS MÚLTIPLES APUESTAS DE STEPHEN HAWKING

Stephen Hawking es uno de los científicos más famosos del mundo. Además de su valía como físico, su espíritu de superación frente a sus conocidos problemas de salud (padece esclerosis lateral amiotrófica o ELA) le ha convertido en un ícono popular. Su imagen, real o animada, ha aparecido en series conocidas como *Star Trek la Nueva Generación*, *Futurama*, *Los Simpson* y *The Big Bang Theory*, donde la vecina Penny le describe como «el tío de la silla de ruedas que inventó el tiempo». Menos conocida es su faceta como apostador, pero no crean que es un ludópata. Las apuestas científicas son una forma inocente de contrastar ideas que permite avanzar en el conocimiento científico y, en diversas ocasiones, Hawking ha desafiado a sus colegas a demostrar o refutar ciertos elementos de una teoría, con un premio de por medio. El anuncio del CERN en 2012 de que se observaba una partícula consistente con el bosón de Higgs, por ejemplo, le obligó a desembolsar cien dólares al físico Gordon Kane. La primera apuesta científica de Hawking le llevó a cruzar espadas con su colega y amigo Kip Thorne, del instituto de investigación estadounidense de ciencia avanzada Caltech. La cuestión fue la siguiente: ¿tiene el sistema llamado Cygnus X-1 (la fuente más brillante observable de rayos X, situada en la constelación del Cisne) un agujero negro en su interior? Hawking, teórico de los agujeros negros, afirmó que no. Según sus palabras, «hice la apuesta como una especie de póliza de seguros para mí, he realizado una gran cantidad de trabajos sobre agujeros negros y estaría todo perdido si resultara que los agujeros negros no existen». En 1975, cuando formuló la apuesta, afirmó que existía una certeza del 80% de que Cygnus X-1 fuese un agujero negro, en 1988 la subió al 95% ... y en 1990 aceptó la derrota. Nuevos resultados experimentales confirmaron que, efectivamente, existía un agujero negro en Cygnus X-1. El ganador se llevó a casa una suscripción anual a la revista erótica *Penthouse*.

Acerca de singularidades desnudas

A comienzos de los noventa, Thorne y su colega John Preskill apoyaron la tesis de que una singularidad gravitacional puede aparecer sin que haya un horizonte de sucesos asociado. Hawking creyó que las leyes de la física impedirían la existencia de ese fenómeno, llamado «singularidad desnuda». Pero cinco años después, Matthew Choptuik demostró, mediante simulaciones informáticas, que esas singularidades pueden existir bajo determinadas circunstancias. Entonces, Hawking aludió que ello no indicaba que las singularidades desnudas pudiesen suceder de modo natural. Sin embargo, en 1997, concedió la victoria a sus contrincantes, una noticia que llegó a ser portada del *The New York Times*. El premio para los dos ganadores fue de cincuenta libras esterlinas y «ropa para cubrir la desnudez del ganador». Hawking perdió por lo que él llamó «un tecnicismo», y apostó de nuevo en 1997 esgrimiendo otra cuestión: ¿se pierde la información que cae en un agujero negro? En esa ocasión, Hawking y Thorne se aliaron y afirmaron que sí. Hawking demostró su propio error en 2004 y entregó a John Preskill su premio, una enciclopedia de béisbol; pero Thorne no ha aceptado la derrota todavía, y no hay consenso científico sobre quién tiene razón. Y es que no es una cuestión baladí: además de una enciclopedia está en juego la posibilidad de poder viajar a otros universos a través de los agujeros negros.



Representación gráfica del bosón de Higgs (arriba) e ilustración del agujero negro Cygnus X-1 (abajo), ambos motivo de una apuesta científica de Stephen Hawking.

no son visibles porque su tamaño es del orden de 10^{-35} metros, la escala de Planck, pero son increíblemente energéticas y cuando vibran dan lugar a las partículas elementales que conocemos.

Una de las características más llamativas de la teoría de cuerdas es su predicción de que existen más dimensiones enrolladas. En este sentido recuerda a la teoría de Kaluza-Klein, que postulaba una dimensión espacial extra, pero esta nueva teoría requiere más dimensiones: nada menos que 26, incluido el

tiempo. Si introducir una dimensión fue un concepto escandaloso en su momento, inventarse una veintena roza lo desmedido.

Con todo, el absurdo de inventarse tantas dimensiones adicionales puede pasarse por alto si, a cambio, permite desarrollar una teoría de campo

Mi objetivo es simple: comprender el universo de forma completa, entender por qué es como es y, en definitiva, por qué existe.

STEPHEN HAWKING

cuántica para la gravedad. La teoría de cuerdas parecía una candidata ideal: carece de infinitos no renormalizables y, de hecho, uno de los modos de vibración de las cuerdas se asoció al gravitón, la partícula hipotética que, se supone, transmite las interacciones gravitatorias por el espacio. Si resulta que solamente funciona en un universo de 26 dimensiones, tendremos que aceptarlo.

Por un momento pareció que la teoría de cuerdas estaba destinada a convertirse en la teoría del todo, la ecuación definitiva para el universo. Eso hubiera rematado felizmente otro juego de palabras de esos que parecen tan populares entre los físicos teóricos. El término «teoría del todo» se abrevia en inglés como TOE (*Theory of Everything*). La expresión inglesa *on your toes* (literalmente, «de puntillas») se usa para expresar un estado de alerta en el que se dedican todos los esfuerzos y energía a la consecución de una meta, algo así como «ponerse las pilas». Resultaría divertido descubrir que lo que nos permite estar alerta y de puntillas sea... un conjunto de cuerdas.

Con juego de palabras o sin él, se descubrió que el ámbito de aplicación para la teoría de cuerdas resulta muy limitado. Una forma de clasificar las partículas es dividir las según su espín, que puede tomar valores enteros (0,1,2...) o semiente-

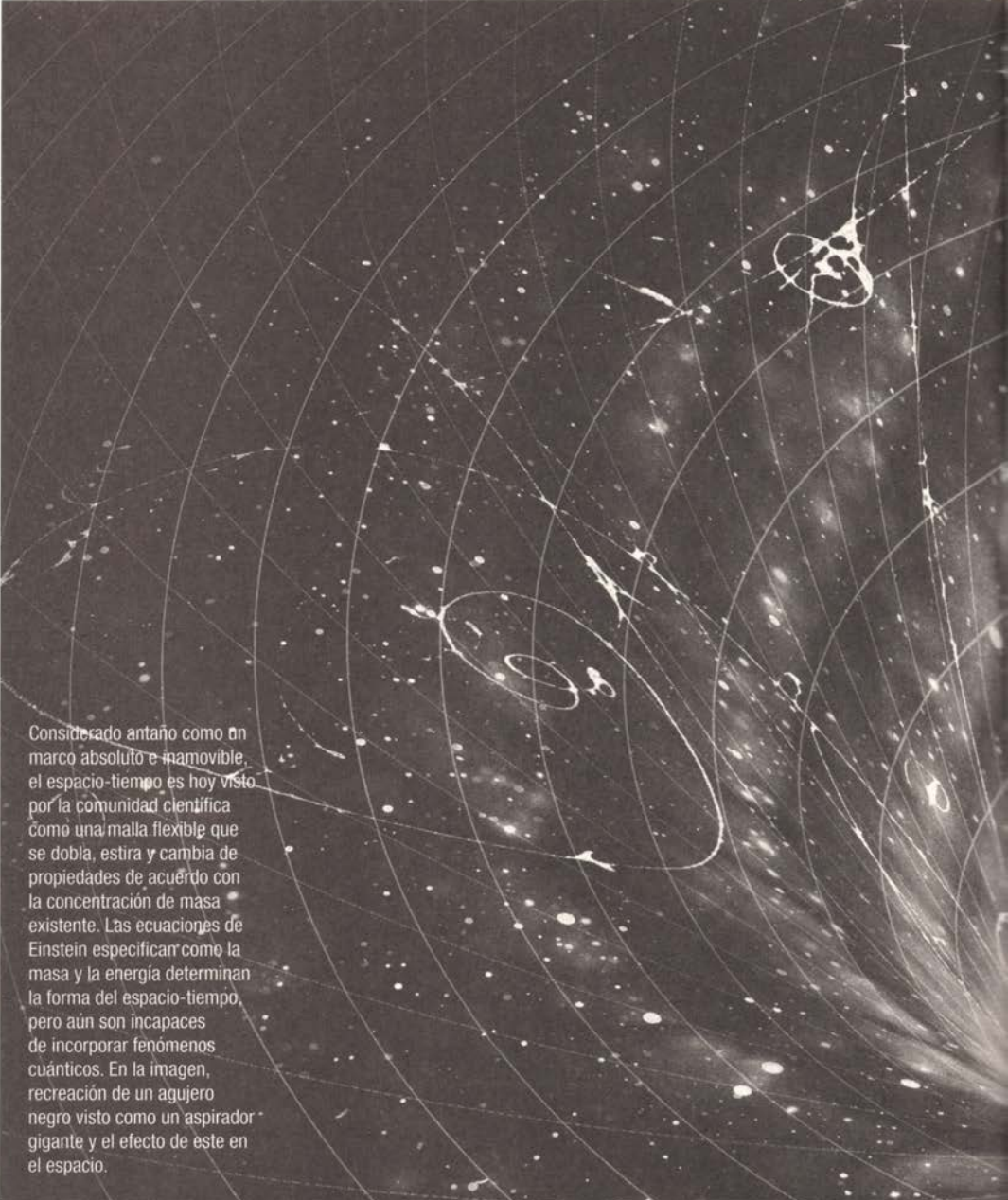
ros ($1/2$, $3/2$, $5/2$...). Pero la teoría de cuerdas solamente tiene aplicación a partículas de espín entero, los llamados bosones, y ese es el motivo de que se conozca con el nombre de teoría de cuerdas bosónicas. Los fermiones quedan fuera de su alcance y, puesto que los fermiones incluyen partículas como los quarks y los electrones, es evidente que queda mucho camino por recorrer.

OTRA TEORÍA MÁS: LA SUPERSIMETRÍA O SUPERCUERDAS

En un intento por acomodar más partículas al panorama de la teoría de cuerdas, se desarrolló una nueva idea llamada supersimetría. Por sí sola es incapaz de unificar la gravitación con las otras fuerzas, pero cuando se combina con la teoría de cuerdas el panorama cambia radicalmente. Aplicada al modelo estándar, la supersimetría (SUSY para los amigos por *Supersymmetry*) predice la existencia de una partícula supersimétrica para cada partícula existente. El factor relevante aquí es el hecho de que, si la partícula es un fermión, su partícula supersimétrica es un bosón, y viceversa. De ese modo, el electrón (fermión) estará asociado al selectrón (bosón).

Una teoría de cuerdas en la que los fermiones se sustituyesen por sus equivalentes supersimétricos podría funcionar y, como ventaja adicional, el número de dimensiones de la teoría disminuiría de 26 a 10. Adicionalmente, puesto que las partículas elementales bosónicas son las portadoras de las interacciones, la supersimetría es un camino para equiparar las fuerzas y la materia, una forma realmente elegante de simetrizar el contenido del universo.

Con el desarrollo de la cromodinámica cuántica, la nueva teoría de cuerdas supersimétrica (también llamada teoría de supercuerdas) fue ignorada, de forma similar a como la teoría de Kaluza-Klein fue descartada en favor de la mecánica cuántica; pero en este caso la nueva teoría no se iría sin luchar. La teoría de supercuerdas permite una comprensión de la gravitación como teoría cuántica de campos, y se desarrollaron varias



Considerado antaño como un marco absoluto e inamovible, el espacio-tiempo es hoy visto por la comunidad científica como una malla flexible que se dobla, estira y cambia de propiedades de acuerdo con la concentración de masa existente. Las ecuaciones de Einstein especifican cómo la masa y la energía determinan la forma del espacio-tiempo, pero aún son incapaces de incorporar fenómenos cuánticos. En la imagen, recreación de un agujero negro visto como un aspirador gigante y el efecto de este en el espacio.



de ellas. Emergieron cinco como posibles candidatas, denominadas tipo I, tipo IIA, tipo IIB, heteróticas HO y heteróticas HE.

Cinco teorías compitiendo entre sí por demostrar su valía para quedar como único modelo válido es receta segura para la confusión, pero por fortuna apareció un pacificador, el norteamericano Edward Witten. En 1995 sugirió que, en realidad, las cinco teorías estaban relacionadas entre sí de forma intrincada, con lo cual eran aspectos de una única teoría de cuerdas (para entonces se había eliminado el prefijo «súper», que se da por sentado). Es como el viejo aforismo de los ciegos que palpan un elefante: cada uno de ellos dará una descripción distinta, pero en el fondo hablan del mismo animal.

La nueva teoría unificadora propuesta por Witten fue bautizada como *teoría M* (existen muchas hipótesis sobre el significado de la M. Podría referirse a «magia», «matrix» o «membrana» pero Witten nunca ha desvelado del todo ese misterio). Sus características más sobresalientes son:

- Se trata de un espacio de once dimensiones (diez espaciales y una temporal), siete de las cuales estarían compactificadas.
- Está compuesto de láminas de varias dimensiones denominadas *branas* (término derivado de la palabra «membrana»).

Este último concepto es una generalización de la idea de cuerdas. Un punto presenta una dimensión cero, una cuerda tiene una única dimensión y una membrana posee dos. Una p -brana equivaldría a p dimensiones y una 9-brana en un espacio de 10 dimensiones, se comportaría de forma análoga a una membrana bidimensional en el espacio tridimensional habitual. En cuanto al número de dimensiones, nuevamente es una cantidad que no se escoge a capricho. O bien nuestro universo tiene 11 dimensiones o, sencillamente, no funciona.

¿Es la teoría M una candidata viable a la teoría del todo? Resulta difícil de imaginar siquiera, pues carece de una formulación completa y apenas está siendo comprendida en sus aspec-

tos más básicos. El escollo más grande con que se encuentra la teoría M es, literalmente, su enorme envergadura. Tantas dimensiones constituyen un gran problema.

Como se comentó anteriormente, en la teoría de Kaluza, la quinta dimensión está «compactificada» o empaquetada de forma similar a como una hoja bidimensional puede enrollarse para formar un fino cilindro. Con siete dimensiones de más, existe una gran variedad de posibles modos de compactificación. Eso da lugar a una cantidad tan alta de posibilidades que apenas si puede cuantificarse. Algunas estimaciones dan una cantidad de $S = 10^{500}$ posibles universos potenciales según la teoría de cuerdas, cada uno de ellos con un valor de la energía del vacío y con leyes físicas diferentes.

El mero hecho de disponer de tantos «universos» potenciales plantea un fallo de concepto. Habitualmente un científico desarrolla una hipótesis y, si una observación o experimento la refuta (o, como se dice en ocasiones, consigue falsarla), hay que descartar la hipótesis o, como mínimo, modificarla. Por contra, ningún experimento conseguirá falsear la teoría de cuerdas porque siempre podremos echar mano de una compactificación distinta, de una variedad distinta de parámetros. Una teoría que pueda «tunearse» para arrojar cualquier resultado que queramos, puede que sea muy flexible pero no tiene capacidad predictiva alguna.

Algunos investigadores expertos en teorías de cuerdas han llegado a proponer un relajamiento de las normas habituales del método científico, sugiriendo que, aunque una teoría no pueda someterse a comprobación experimental, debería aceptarse si es lo bastante «elegante». Es decir, que parezca válida al margen de que lo sea o no. Como dicen los italianos sobre una historia dudosa pero hermosa, *si non é vero e ben trovato*. La teoría M, como cualquier otra, debe ser capaz de efectuar predicciones o, al menos, ofrecer algún modo de verificación experimental. De otro modo se quedará en mera conjetura.

El debate está en su apogeo y muestra hasta qué punto el deseo por obtener una teoría del todo desata las imaginaciones más desbocadas.

¿HAY CIENCIA DESPUÉS DE UN ESPACIO-TIEMPO CUÁNTICO?

En estos momentos la teoría de cuerdas parece ser la mejor candidata a convertirse en una gran teoría unificadora de todos los fenómenos, partículas e interacciones del universo. Sin embargo, la falta de predicciones y su extrema complejidad mantiene escéptica a buena parte de la comunidad científica; por su parte, los físicos de cuerdas son bien conscientes de que, si bien no han alcanzado sus objetivos finales, al menos la teoría de cuerdas es la única que puede lograrlo.

Pero aunque la teoría de cuerdas (se presente como la teoría M o bajo cualquier otra forma) sea la candidata con más posibilidades, después de cuatro décadas de desarrollo dista mucho de ser una teoría completa. El físico holandés Gerardus 'tHooft se niega incluso a llamarla teoría por su falta de concreción y la ausencia de propiedades predictivas: «Imagine que le doy una silla, mientras le explico que todavía faltan las patas, y que el asiento, el respaldo y los brazos quizá llegarán pronto; ¿podría seguir llamando silla a cualquier cosa que le diera?».

En realidad, ni siquiera tiene ecuaciones al estilo de otras teorías, como la relativista o la de Newton y, más que una teoría, quizá debería llamarse un modelo. La diferencia es importante. Una teoría tiene capacidad de describir y predecir, pero un modelo se limita a ser una descripción somera de la realidad. A los estudiantes todavía se les enseña el modelo planetario del átomo, en el cual el núcleo hace el papel del Sol y los electrones giran a su alrededor como planetas orbitando. Sigue siendo una primera aproximación bastante sencilla, pero para efectuar cálculos de precisión se necesita una teoría cuántica. El modelo de cuerdas parece encontrarse en una situación similar.

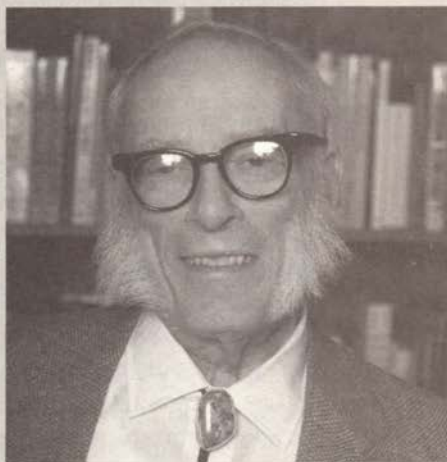
Apremiados por la necesidad de demostrar la valía de su modelo, los teóricos de cuerdas han propuesto un universo dividido en burbujas, en cada una de las cuales las leyes de la física son distintas. Puede que esos 10^{500} universos posibles que permite la teoría existan realmente en un metauniverso más grande que todo lo imaginable. Queda el problema de averiguar por qué nuestro universo es el que es, por qué le ha tocado este conjunto de leyes.

¿ES LA HORA DE LA PSICOHISTORIA?

A comienzos de la década de 1950, el escritor de ciencia ficción Isaac Asimov creó su famosa *Trilogía de la Fundación*. Uno de los personajes principales, Hari Seldon, es un científico que descubre una nueva ciencia para estudiar la reacción de la humanidad ante las fuerzas sociales de cada época, fueran religiosas, políticas, económicas o militares. El comportamiento de grandes poblaciones de seres humanos puede describirse, afirma Seldon, de modo similar a como la termodinámica permite modelar las interacciones entre ingentes cantidades de átomos. Armado con su ciencia, a la que llamó «psicohistoria», Seldon establece una fundación para mantener un núcleo de ciencia frente a la decadencia del Imperio Galáctico. Hoy, las ciencias sociales modernas, con sus estudios matemáticos que van desde la teoría de juegos a la macroeconomía, quieren convertirse en la nueva psicohistoria. Una de las ideas más ambiciosas, la llamada economía histórica, estudia esos fenómenos del pasado mediante una combinación de métodos históricos, económicos y estadísticos. El norteamericano Peter Turchin, que empezó estudiando poblaciones animales mediante procedimientos matemáticos, es hoy uno de los impulsores de una nueva ciencia a la que llamó «cliodinámica», en honor a Clío, la musa de la historia. Su objetivo, como el de la psicohistoria de Asimov, es la modelización de las fuerzas sociales. ¿Hay leyes sociales, del mismo modo que existen leyes físicas? ¿Qué mecanismos subyacen a los acontecimientos históricos? ¿Puede predecirse el futuro?

Una improbable bola de cristal

Según Turchin, la cliodinámica aplicada a la historia de los Estados Unidos permite desvelar la aparición de ciclos periódicos de inestabilidad social cada cien años, a los que se unen ciclos de violencia política cada cincuenta. Pero sus críticos no se dejan impresionar. Un país con un pasado esencialmente violento y con una historia tan corta como la de los Estados Unidos lógicamente debe esperar ciclos de inestabilidad social; y los mismos ciclos de violencia que aparecen tan claramente en un país resultan inexistentes en otro. ¿Tiene razón la cliodinámica? Turchin predice una nueva ola de violencia política para la década de 2020. Los medios de comunicación parecen darle la razón, pero la violencia es consustancial a la historia humana. Necesitamos una auténtica psicohistoria para realizar predicciones detalladas, pero tardaremos muchos años en disponer de ella. Y es que la dificultad de estudiar objetos tan impredecibles como el ser humano es casi infinita.



Isaac Asimov, autor de la *Trilogía de la Fundación*.

La respuesta viene de la mano del principio antrópico, que establece que toda teoría será válida si puede explicar la existencia del ser humano. Según esa concepción, las condiciones de nuestro universo son aquellas que permiten el desarrollo de estrellas, planetas y vida inteligente. En cierto modo es como es porque nosotros estamos aquí. El lector puede encontrar extraña esta clase de lógica y, hasta cierto punto, su confusión está justificada, ya que causa y consecuencia parecen intercambiar sus papeles. Una aerolínea existe para transportar pasajeros de un lugar a otro del globo, pero no tiene sentido justificar las leyes de la aerodinámica con el argumento de que, si no fuesen como son, usted no podría haber volado de París a Tokio el pasado verano.

Por supuesto, la teoría (o modelo) de cuerdas no es la única existente. Hay alternativas, aunque ninguna de ellas tiene la suficiente claridad y capacidad predictiva para lograr la gran unidad de fuerzas que constituiría la culminación del sueño de la física moderna. El sueño de Einstein de unificar relatividad y cuántica sigue muy lejos a fecha de hoy, y no podemos más que especular cuándo se conseguirá.

Algunos problemas pendientes

Hagamos un ejercicio de abstracción, y supongamos que, de algún modo, la teoría del todo ya ha sido formulada. Su descubridor será recordado y ensalzado durante siglos junto con Newton y Einstein como uno de los mayores genios en la historia de la física. Ahora bien, ¿significa eso que la propia física ha pasado a la historia? ¿Podremos afirmar (como dijo lord Kelvin hace más de un siglo) que el estudio de la física ha concluido y que todo lo que queda por hacer es calcular más decimales?

Las teorías físicas, que son conjuntos de ecuaciones que relacionan variables entre sí, vendrían a ser los planos del gran edificio del universo. Cualquier arquitecto sabe que, una vez diseñado el plano, hay que construir el edificio. Existe, por tanto, mucha ciencia más allá de la gran ecuación.

Estudiar las consecuencias de una teoría puede llevar mucho tiempo. La relatividad general proporciona buenos ejemplos en este sentido. Poco después de que Albert Einstein desarrollara sus ecuaciones sobre esta teoría, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild encontró una solución para explicar el campo gravitatorio creado por una masa puntual, en esencia un agujero negro. Más tarde, en los años treinta, el astrofísico indio Subrahmanyan Chandrasekhar demostró que los agujeros negros podían ser objetos reales generados en las etapas finales de la evolución de algunas estrellas. A pesar de ello, no consiguió obtener las ecuaciones para un agujero negro en rotación, logro que consiguió el matemático neozelandés Roy Kerr en 1963.

Un siglo después de su primera aparición teórica dentro de la relatividad, los agujeros negros continúan siendo objetos misteriosos, y sus propiedades aún no están bien determinadas. Solamente podemos imaginar qué otras sorpresas quedan por descubrir, ocultas entre los pliegues de las ecuaciones de Einstein.

No es necesario que una teoría sea tan compleja y trascendental como la relatividad o la cuántica para deparar sorpresas. Sucede en ocasiones que un problema físico se basa en ecuaciones relativamente simples, pero la extensión del sistema a estudiar o la cantidad de partículas involucradas convierten, en la práctica, al problema en irresoluble. Hay muchos ejemplos a nuestro alrededor: la turbulencia, la rotación de una galaxia, la modelización del clima.

Las ciencias sociales como la epidemiología, la economía, la política o la sociología resultan especialmente difíciles de abordar, porque las «partículas» sometidas a estudio son los propios seres humanos, dotados de un complejo entramado de intereses y prejuicios que los convierte en prácticamente inescrutables. El altruismo, el egoísmo, los genes, los comportamientos grupales y la pura y llana estupidez se combinan para dar al traste con cualquier intento riguroso de describir el comportamiento de las agrupaciones humanas mediante ecuaciones matemáticas.

Hay casos en los que las ecuaciones son claras y rigurosas pero la solución es imposible, o cuando menos inviable. Un ejemplo viene dado por el *problema de los n cuerpos*. La ley de

gravitación universal de Newton permite conocer con gran precisión el comportamiento de dos cuerpos que se atraen mediante fuerzas gravitatorias. Sin embargo, cuando los cuerpos en interacción son tres o más, el problema se hace irresoluble. La ley de gravitación sigue siendo válida, pero no existe una fórmula que nos permita determinar la forma de las órbitas o la posición de un objeto en el futuro. Cualquier intento por establecer una solución exacta para, por ejemplo, la estabilidad de las órbitas planetarias, está abocado al fracaso.

Eso no significa que, cuando esto sucede, los ingenieros de la NASA alcen los brazos en señal de frustración y se vayan a casa. Al contrario, se las ingenian para mandar sondas interplanetarias a recorrer los cuerpos de nuestro sistema solar, saltando de uno a otro. ¿Cómo lo consiguen? Mediante una serie de técnicas que se han ido desarrollando con los años y que combinan soluciones aproximadas, métodos numéricos y aproximaciones que permiten simplificar los cálculos.

En resumen, incluso en el mejor de los casos una teoría completa no acaba con el trabajo de la ciencia. Eso suponiendo que una teoría tal sea siquiera concebible, cosa que no está demostrado. ¿Qué nos da la confianza para pronosticar que algún día se descubrirá la teoría definitiva?

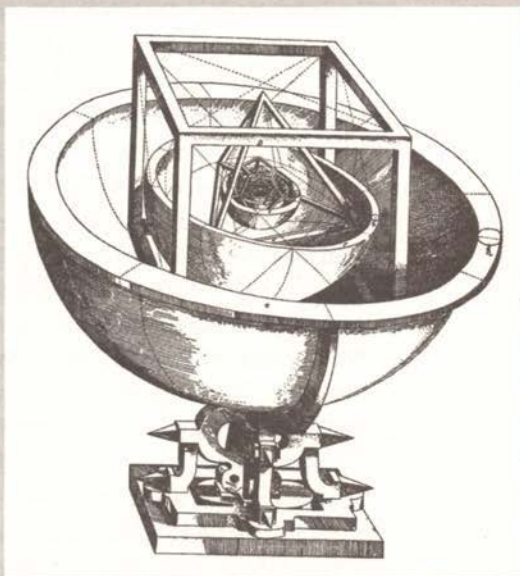
Los límites de la ciencia

A lo largo de los siglos hemos descubierto que la naturaleza tiene pautas que podemos codificar de forma matemática. Inventamos teorías, las contrastamos con un experimento, comprobamos si son o no válidas, las perfeccionamos o modificamos y, a lo largo del proceso, nuestras herramientas de hacer ciencia se van haciendo cada vez más útiles, más poderosas, más válidas.

Este es el procedimiento que, de un modo u otro, ha seguido la humanidad durante milenios y que llamamos método científico. Se trata de un camino, no de un destino, y ni siquiera sabemos si ese camino tiene un final. Algunos científicos opinan que no, que averiguar las leyes de las ciencias es como pelar

LA ARMONÍA MATEMÁTICA DE LOS CIELOS

A comienzos del siglo XVII, el matemático y astrónomo Johannes Kepler deseaba conocer el mecanismo interno del sistema solar. En un mundo asolado por la peste, la guerra y los conflictos religiosos, la búsqueda de la armonía entre las estrellas constituía una tarea placentera. Kepler creía en un Dios creador y quería conocer sus planes para el universo. No fue el primero en trabajar siguiendo ese deseo y tampoco sería el último. Kepler supuso que los cinco planetas conocidos entonces (sin contar la Tierra) debían estar relacionados de algún modo con los cinco sólidos regulares: tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro. Seguía con ello la idea de la armonía de las esferas, según la cual el universo está basado en proporciones numéricas armoniosas. De ese modo, las órbitas de los planetas guardarían entre sí razones matemáticas sencillas, similares a las de los intervalos entre notas musicales. Por supuesto, tales órbitas debían ser circulares. Era inevitable, se decía, ya que los cielos son dominio del Creador y allí rige la perfección. Para comprobar su teoría, Kepler necesitaba datos precisos sobre el movimiento de los planetas. Tycho Brahe, matemático imperial del Sacro Imperio, era la persona que poseía esos datos, pero los guardó celosamente durante años. Kepler necesitó armarse de paciencia y, finalmente, logró su objetivo. Para su desgracia, las observaciones de Brahe no confirmaban las teorías de Kepler. Había una pequeña discrepancia en el movimiento del planeta Marte. Quizá otra persona con menos escrúpulos hubiera ocultado esa pequeña discrepancia, pero Kepler decidió actuar como lo que era: un científico. Fue honrado consigo mismo y con la ciencia, y esa decisión le costó cara. Tras reconocer que su querida teoría sobre el movimiento planetario no era correcta, tuvo que abandonarla. Si Dios existía, desde luego no era el matemático riguroso que había creído. Aunque, en realidad, el universo sí se comportaba de forma matemática, pero no del modo que Kepler esperaba. El movimiento de los cuerpos celestes en órbitas elípticas forma parte de lo que ahora conocemos como leyes de Kepler. El Dios pitagórico y armonioso, amante de la armonía de las esferas, dio paso a la hipótesis de un Dios matemático.



Modelo del sistema solar kepleriano, basado en los sólidos regulares según una imagen del *Mysterium Cosmographicum* de Johannes Kepler, 1596.

una cebolla con infinitas capas. Otros, por el contrario, creen que hay un núcleo último de conocimiento y que, en principio, algún día podríamos llegar a él y determinar todas las leyes que rigen el universo.

¿Podemos siquiera demostrar que la ciencia es una cebolla infinita? ¿Podemos demostrar que no lo es?

Durante siglos ha circulado lo que se conoce como «paradoja del mentiroso», que se explica a partir de la siguiente oración:

Esta frase es falsa.

La paradoja consiste en plantearse si esa declaración es cierta o falsa. Si es cierta, entonces lo que dice es verdad: la frase es falsa; por otro lado, si fuese falsa, lo que dice es mentira, y por tanto será verdadera. De ese modo llegamos a una contradicción: si es cierta, es falsa; y si es falsa, es cierta. Según los principios de la lógica, la frase es cierta y falsa a la vez, o bien no es ni cierta ni falsa.

Algo similar sucede en el campo de las matemáticas. Habitualmente se establecen ciertas verdades por definición, llamadas axiomas, y se construyen resultados a partir de ellos. A veces un conjunto de axiomas puede conducir a una paradoja similar a la del mentiroso, y para evitarlo, en 1920 el matemático David Hilbert propuso una nueva formalización de las matemáticas que permitiera basarlas en un conjunto de axiomas capaces de demostrar o refutar cualquier afirmación matemática sin que aparezcan paradojas o contradicciones.

Sin embargo, en 1931 el matemático austríaco Kurt Gödel demostró que un sistema matemático así será necesariamente indecidible en algunos casos. Es decir que, aunque plantee afirmaciones verdaderas, su certidumbre no podrá demostrarse ni refutarse. Pocos años después, el matemático Alan Turing demostró la imposibilidad de demostrar (o refutar) todas las afirmaciones de un sistema matemático mediante un ordenador. Ni la mente humana ni la del ordenador pueden crear un sistema matemático completo y libre de paradojas.

¿Existe la posibilidad de que suceda algo así en física? O lo que es lo mismo, ¿hay algún problema físico que no pueda en

principio ser resuelto mediante teorías y matemáticas? A día de hoy tenemos muchas preguntas sin responder. Pero ¿podremos responderlas mañana? No lo sabemos. La actitud de los científicos es seguir trabajando como si algún día pudiésemos acceder a todo el conocimiento sobre el cosmos.

Hasta ahora no hemos encontrado una contradicción básica que nos detenga en la búsqueda de más y mejores leyes físicas, de modo que el progreso científico sigue adelante. Este proceso puede continuar indefinidamente. O no. Stephen Hawking, en su libro *Historia del tiempo*, describe tres posibles futuros para el desarrollo de la ciencia:

- Futuro 1: Existe una teoría unificadora completa, y algún día la encontraremos.
- Futuro 2: No existe una teoría única de todo sino una sucesión de teorías parciales que describen el universo con cada vez mayor precisión.
- Futuro 3: No se pueden predecir los acontecimientos en el universo más allá de cierto punto, ya que suceden de forma aleatoria y en cierto modo arbitraria.

Cada uno de estos tres futuros resulta inquietante. Si existe una teoría definitiva, su descubrimiento pondrá punto final a la búsqueda de la verdad científica que comenzó antes de Aristóteles. Ciertamente es que habrá todavía mucho trabajo por hacer, pero la situación será similar a la de un continente conquistado: territorios y colonización, rutina para los cartógrafos. Al desaparecer las fronteras de la ciencia, ¿qué será del espíritu explorador de la humanidad?

La ausencia de una teoría única puede ser aún peor. Sustituir una teoría parcial por otra y luego por otra más en un proceso sin fin recuerda al viejo mito de una Tierra plana a lomos de una tortuga. ¿En qué se apoya esa tortuga? En otra, y esa nueva tortuga se apoya en otra, y así sucesivamente porque nunca se acaban las tortugas. El proceso de descubrir esas infinitas tortugas

puede convertirse en una labor digna de Sísifo. Finalmente, si resulta que nuestras leyes físicas solamente consiguen describir la naturaleza hasta cierto punto, ¿nos conformaremos con eso y dejaremos de investigar?

La ciencia contemporánea parece seguir las tres sendas a la vez. Las teorías físicas actuales permiten describir los fenómenos naturales cada vez mejor (Futuro 2) a la espera de una teoría definitiva (Futuro 1), pero la mecánica cuántica nos impone una forma aleatoria e indeterminada de conocer los acontecimientos (Futuro 3). Conocer cuál será nuestro futuro real es algo que no podemos sino conjeturar.

Oteando el más allá

A lo largo de la historia, los científicos han sido conscientes de que la ciencia no arroja respuestas a todas las preguntas. La ley de gravitación de Newton explica cómo y de qué forma los cuerpos son atraídos por efecto de su masa, pero no responde a la pregunta del porqué. ¿Qué mecanismo hace que las fuerzas tengan ese valor? ¿Por qué motivo el universo es como es?

Traspasar las fronteras de la ciencia para hollar un territorio donde el método científico no puede proporcionar respuestas es tarea arriesgada y especulativa. Algunos científicos apelan a la religión, otros rechazan ir más allá. En tiempos de Kepler y Newton no era extraño recurrir a la existencia de un creador último, lo que dejaba claro que la tarea del hombre es limitarse a describir el funcionamiento del universo sin entrar en los porqués.

Esa visión contrasta con el planteamiento del matemático francés Pierre-Simon Laplace, quien fue interrogado en cierta ocasión por Napoleón sobre por qué no mencionó ni una vez a Dios en uno de sus libros. La respuesta de Laplace fue sencilla: «*Sire*, nunca he necesitado esa hipótesis». Grandes científicos como Stephen Hawking se atreven a afirmar ocasionalmente que no necesitan la «hipótesis de Dios» para explicar la existencia del universo.

Si algún día el ser humano alcanza la anhelada meta de la unificación de las leyes de la física y descubre la teoría del todo,

tendrá a su disposición la herramienta definitiva para profundizar en el entendimiento del cosmos. Pero será tan solo una herramienta. Las respuestas a las grandes preguntas que tanto nos intrigan (¿quiénes somos?, ¿de dónde venimos?, ¿cuál es el propósito de la vida?) deberán provenir de otra fuente. Esa es tarea de filósofos, metafísicos y pensadores.

La encrucijada en la que se encuentra el ser humano fue descrita a finales de los años setenta por el escritor Douglas Adams en su obra *Guía del Autoestopista Galáctico*, uno de los libros de ciencia ficción más irreverentes y disparatados que existen. En uno de los capítulos se narra cómo una civilización hiperinteligente y muy avanzada construye un superordenador para descubrir la Respuesta sobre la Vida, el Universo y Todo. Tras varios millones de años, la máquina está por fin dispuesta para dar la solución. Y llega la respuesta:

Cuarenta y dos.

Los espectadores se quedan sin habla. ¿Cuarenta y dos qué? El ordenador se mantiene firme, la respuesta es 42. Eso sí, advierte, quizá el problema estriba en que los programadores estaban tan preocupados por la respuesta que no sabían cuál era la pregunta.

En cierto modo, lo que buscamos nosotros es una respuesta a una pregunta que no conocemos. Y la respuesta no parece que sea el número 42.

LECTURAS RECOMENDADAS

////////////////////////////////////

- EINSTEIN, A., *El significado de la relatividad*, Barcelona, Austral, 2005.
- GREENE; B., *La realidad oculta*, Barcelona, Planeta, 2011.
- HAWKING, S., *Historia del tiempo*, Barcelona, Crítica, 2011.
- HAWKING, S.; MLODINOV, L., *El gran diseño*, Barcelona, Crítica, 2010.
- PAIS, A., *El señor es sutil*, Barcelona, Ariel, 1984.
- PENROSE, R., *La nueva mente del emperador*, Madrid, Mondadori, 1991.
- RANDALL, L., *Universos ocultos*, Barcelona, Acantilado, 2011.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- SMOLIN, L., *Las dudas de la Física en el siglo XXI*, Barcelona, Crítica, 2007.
- SUSSKIND, L., *La guerra de los agujeros negros*, Barcelona, Crítica, 2009.

ÍNDICE

- Adams, Douglas 143
agujero negro 98, 122-124, 126,
130, 137
antipartícula 105, 113, 123, 124
Aristóteles 17, 20, 141
armonía de las esferas 139
Arquímedes 17
Ashtekar, Abhay 121
Asimov, Isaac 135
- barión 107, 110
Bekenstein, Jacob 122
Bell, John 94
Bjorken, James 108, 109
Bohr, Neils 30, 43-47, 53, 87, 90,
94, 95
 modelo atómico de 29, 43
BOINC 96
bosón 99, 106, 112, 113, 126, 127,
129
Brahe, Tycho 139
brana 10, 132
Brogie, Louis de 42
- catástrofe ultravioleta 11, 39, 40,
41, 49
causalidad, principio de 91
CERN 112, 114, 115, 126
Chandrasekhar, Subrahmanyam
137
Choptuik, Matthew 126
clodinámica 135
color, carga de 108, 110, 113
computación distribuida 96
cosmos 10, 11, 15, 23, 141, 143
Coulomb, ley de 24
covariancia 78
cromodinámica cuántica (QCD)
107, 110, 112, 129
cuantización 29, 40, 42, 43, 46, 98
Cygnus X-1 126, 127
- Darwin, Charles 20
Demócrito 18
desintegración
 beta 30,-32
 del protón 117-119

- dilatación temporal 55-58, 63
- dimensiones
 - compactificadas 83, 85, 125
 - enrolladas 81, 125, 128
- Dirac, Paul 47, 53, 104-106
 - mar de 104-106
- eclipse solar de 1919 72, 74, 75
- economía histórica 72
- Eddington, Arthur 74
- efecto
 - Compton 42
 - fotoeléctrico 40, 42, 89
- Einstein, Albert 9, 11, 20, 25, 26, 29, 42, 46, 48, 53, 54, 57-65, 69, 70, 72-74, 76, 78, 79, 81, 82, 84, 87, 89, 90, 91, 93-95, 101, 103, 106, 113, 120, 121, 130, 136, 137
- Einstein@home 96
- electricidad 9, 23, 24, 76
- electrodinámica cuántica (QED) 106, 112
- electromagnetismo 9, 27, 34, 43, 58, 67, 72, 73, 76, 78, 80-82, 84, 99, 106, 111, 112, 125
- electrón 28, 30-32, 40-44, 80, 84, 91, 92, 104-107, 113, 116, 119, 129, 134
- entrelazamiento cuántico 95
- entropía 31, 122, 123
- Eötvös, Loránd 32, 33
- espacio-tiempo 10, 58, 60-62, 64, 65, 72, 81, 84, 95, 98, 120, 123, 130, 134
- espín 84, 92-94, 103, 104, 106, 108, 121, 128, 129
- éter 17, 23, 49-51, 76
- Euclides 17
- Everett, Hugh 48
- experimento
 - EPR 91
 - imaginario 48
- Faraday, ley de inducción de 24
- Fermi, Enrico 31
- fermión 104, 129
- Feynman, Richard 106-109
- Fischbach, Ephraim 32, 34
- FitzGerald, contracción de 57
- fotón 42, 44, 47, 92, 94, 95, 99, 104, 106, 110, 113, 120
- Franklin, Benjamin 24, 27
- Frisch, David 55
- fuerza
 - electromagnética 34, 110
 - gravitatoria 32, 59, 64, 79
 - nuclear débil 32, 34, 107, 111
 - nuclear fuerte 30, 107, 111
 - quinta 32-34
- función de onda 46-48, 94, 95
- Galilei, Galileo 9
- Galileo
 - principio de relatividad de 54
 - transformación de 51
- gauge* 77-81, 85
- Gell-Mann, Murray 108, 109
- Glashow, Sheldon 34, 108, 109, 111
- gluon 98, 107, 108, 110, 113, 117
- Gödel, Kurt 140
- Gordon, Walter 103
- GPS 62
- gran colisionador de hadrones 112, 115
- gravidad cuántica 120, 123, 101
- gravitón 98, 99, 120
- hadrón 29, 30, 107, 110, 112, 113

- Hawking, Stephen 122, 123, 126,
128, 141, 142
radiación de 123, 124
- Heaviside, Oliver 26
- Heisenberg, Werner Karl 46, 53
principio de indeterminación
de 47, 90, 98
- Higgs, bosón de 113, 126, 127
campo de 112
- Hilbert, David 73, 76, 77, 140
- Hipócrates 17
- horizonte de sucesos 122-124,
126
- Hulse, Russell 70
- interacciones nucleares 10
- interpretación de universos
múltiples 48
- Jantar Mantar, observatorio
astronómico 18
- Kaluza, Theodor 81, 82, 84, 125,
133
- Kaluza-Klein, teoría de 84, 85,
125, 128, 129
- Kelvin, lord 11, 28, 39, 49,
136
- Kepler, Johannes 70, 139, 142
leyes de 139
- Kerr, Roy 137
- Klein, Oskar 82, 84, 85, 103, 104,
125
- Klein-Gordon, ecuación de 84,
103, 104
- LAGUNA, proyecto europeo 118
- Laplace, Pierre-Simon 142
- Le Verrier, Urbain 70
- Leibniz, Gottfried 20
- ley
de Coulomb, *véase* Coulomb,
ley de
de equipartición 40
de gravitación universal 24,
27, 32, 70, 78, 138, 142
de la reversibilidad
temporal 98
de la termodinámica 122,
123
- Leyden, botella de 24
- LIGO 96
- Lorentz, Hendrik 51, 54, 57
transformación de 54, 58
- luz
desviación de la 72, 74
velocidad de la 26, 27, 44, 49-
51, 54-56, 58, 62, 63, 91, 92,
95, 115
- magnetismo 9, 23, 24, 76
- masa
gravitatoria 64
inercial 64
- Maxwell, James Clerk 26, 27, 34,
43, 72
ecuaciones de 9, 26, 54, 77,
78, 80
- mecánica cuántica 10, 11, 31, 35,
37, 42-44, 46-49, 53, 73, 81, 82,
84, 87, 89, 90, 91, 94, 95, 98, 99,
101-103, 105, 106, 108, 110, 112,
120, 121, 123, 128, 129, 134, 136,
137, 142
- Mercurio, precesión del perihelio
de 69-71
- mesón 107, 108, 110, 113
- metauniverso 134
- método científico 133, 138, 142
- metro 25

- Michelson-Morley, experimento de 11, 49-51
- Mie, Gustav 73, 76
 - dispersión de 77
 - teoría de 77
- modelo estándar 111, 113, 116-118, 120, 129
- mundo
 - sublunar 17, 22
 - supralunar 17
- muon 55, 107, 113, 117
- neutrino 31, 117-119
- neutrón 29-31, 107, 110
- Newton, Isaac 9, 10, 20, 21, 23, 26, 27, 35, 46, 58, 73, 85, 89, 134, 136, 142
- Nordström, Gunnar 69, 72, 81, 125
- Oersted, Hans Christian 24
- ondas
 - electromagnéticas 26, 27, 39, 40, 49, 76, 77, 96, 99
 - gravitacionales 96, 97, 99
- paradoja
 - de la información 124
 - del mentiroso 140
- partículas elementales 107, 113, 117, 125, 128, 129
- Pauli, Wolfgang 31, 53, 104, 106
- Penrose, Roger 121
- Pitágoras 17
- Planck, Max 29, 40, 42
 - constante de 44, 90
 - longitud de 98, 121
- Platón 17
- Podolski, Boris 91
- Poincaré, Henri 54, 58
- positrón 91-93, 105-107
- Preskill, John 126
- principio
 - antrópico 136
 - de equivalencia 59
- problema de los n cuerpos 137
- protón 84, 105, 107, 115, 117, 118, 119
- psicohistoria 135
- Pullin, Jorge 123
- púlsar 70
- quark 29, 30, 107-110, 113, 116, 117, 129
- quintaesencia 17
- radiación térmica 39, 40, 123
- red de espines 121
- relatividad
 - especial 25, 54, 55, 58, 59, 62, 63, 65, 69, 74, 81, 89, 91, 92, 94-96, 103, 104, 106, 113
 - general 11, 26, 35, 37, 48, 51, 53, 59, 60-63, 65, 67, 69, 70, 72-74, 77, 79, 81, 82, 84, 87, 89, 91, 93, 95, 96, 98, 99, 103, 106, 120, 121, 123, 125, 136, 137
- Renner, János 33
- renormalización 98, 106, 107
- Rosen, Nathan 91
- Rovelli, Carlo 121
- Rydberg, Johannes 44,
 - constante de 44, 45
 - fórmula de 44
- sabor 108,
- Sagan, Carl 16
- Salam, Abdus 34, 111

- Schrödinger, Erwin 46, 47, 53,
103
ecuación de 46, 103
gato de 48, 49, 92
Schwarzschild, Hark 137
Schwinger, Julian 106
Scott, Davis 32
Seldon, Hari 135
series espectrales 44, 45
SETI@home 96
simetría electrodébil, ruptura de
la 112
singularidad 122, 125, 126
Smith, James 55
Smolin, Lee 121
Super-Kamiokande 118, 119
- t'Hooft, Gerardus 134
Tales de Mileto 17
Taylor, Joseph 70
teoría
cuántica de bucles (LQT) 120,
121-123, 125
cuántica de campos 106, 107,
110, 120, 121, 129
de cuerdas 125, 128, 129, 133,
134
de cuerdas supersimétricas
(SUSY) 129
de gran unificación (GUT) 116,
118, 119
- de Kaluza-Klein, véase Kaluza-
Klein, teoría de
de la relatividad, véase
relatividad
de Mie, véase Mie, Gustav
de variables ocultas 48
del todo 7, 11, 48, 117, 120, 128,
132, 133, 136, 142
electrodébil 34, 111, 112
M 132, 133, 134
Thomson, William, véase Kelvin,
lord
Thorne, Kip 126
Tolomeo 17
Tomonaga, Sin-Ichiro 106
Trilogía de la Fundación 135
Turchin, Peter 135
Turing, Alan 140
- unificación 9, 22, 24, 26, 34, 48,
67, 73, 76, 84, 85, 106, 111, 112,
125, 142
- Vulcano 70
- Weinberg, Steven 34, 111
Weyl, Hermann 77-79, 85
Wheeler, John 59
Witten, Edward 132
Yukawa, Hidero 30

Espacio-tiempo cuántico

La física moderna se encuentra ante la incómoda posición de obedecer a dos señores que no se hablan entre sí. Cuando se estudia lo microscópico las normas las dicta la teoría cuántica; en el ámbito de lo macroscópico la reina suprema es la relatividad. Los intentos por hallar una teoría subyacente que armonice una y otra, la famosa «teoría del todo», se han topado una vez y otra con obstáculos insalvables. ¿Cuáles son las candidatas más plausibles a erigirse en ese Santo Grial de la ciencia?

Arturo Quirantes es profesor de física en la Universidad de Granada.